

Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen

Herausgeber:

Deutsches Kupferinstitut
Auskunfts- und Beratungsstelle
für die Verwendung von
Kupfer und Kupferlegierungen

Am Bonneshof 5
40474 Düsseldorf
Telefon: (0211) 4 79 63 00
Telefax: (0211) 4 79 63 10
info@kupferinstitut.de
www.kupferinstitut.de

Alle Rechte, auch die des
auszugsweisen Nachdrucks und
der photomechanischen oder
elektronischen Wiedergabe,
vorbehalten.

Auflage 2009

Bearbeitung:

Grit Mayer, Technische Universität Dresden
Betreuung:
Dipl.-Ing. Julia Zähr
Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel

Bildnachweis:

probeam AG & Co. KGaA,
Piel & Adey GmbH & Co. KG,
SLV Berlin,
SLV Duisburg,
Werkzeug- und Maschinenbau Peter Wennrich,
VEM Sachsenwerk GmbH,
Zambelli Fertigung GmbH & Co KG

Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen

Inhalt

1.	Einleitung	2	3.12.1	Allgemeines	18
2.	Werkstofftechnische Grundlagen	4	3.12.2	Elektronenstrahlschweißen	19
2.1	Eigenschaften von Kupfer und Kupferlegierungen	4	3.12.3	Laserstrahlschweißen	21
2.2	Schweißtechnisch relevante Werkstoffeigenschaften	4	3.13	Lichtbogenbolzenschweißen	22
2.3	Metallurgie des Schweißens	4	3.14	Auftragschweißen	22
2.4	Einteilung nach Sauerstoffgehalt	5	3.15	Nachbearbeitung	23
2.5	Gasaufnahme	6	4.	Schweißbeignung von unlegierten Kupferwerkstoffen	24
2.6	Wirkung von Legierungselementen	7	5.	Schweißbeignung von Kupferlegierungen	26
3.	Schweißverfahren	9	5.1	Allgemeines	26
3.1	Besonderheiten bei der schweißtechnischen Verarbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen	9	5.2	Niedrig legierte Kupferwerkstoffe	26
3.2	Gasschweißen	9	5.2.1	Nicht aushärtbare Legierungen	26
3.3	Lichtbogenhandschweißen	9	5.2.2	Aushärtbare Legierungen	28
3.4	Schutzgasschweißen	10	5.3	Hochlegierte Kupferwerkstoffe	30
3.4.1	Allgemeines	10	5.3.1	Allgemeines	30
3.4.2	WIG-Schweißen	10	5.3.2	Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)	30
3.4.3	MIG-Schweißen	11	5.3.3	Kupfer-Zinn-Legierungen (Zinnbronze)	32
3.4.4	Wolfram-Plasmaschweißen	12	5.3.4	Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierungen (Rotguss)	32
3.5	Widerstandsschweißen	13	5.3.5	Kupfer-Blei-Zinn-Gusslegierungen	32
3.5.1	Allgemeines	13	5.3.6	Kupfer-Nickel-Zinn-Legierungen (Neusilber)	33
3.5.2	Widerstands-Punkt- und - Rollennahtschweißen	13	5.3.7	Kupfer-Nickel-Legierungen	33
3.5.3	Buckelschweißen	14	5.3.8	Kupfer-Aluminium-Legierungen	34
3.5.4	Pressstumpfschweißen	14	6.	Thermisches Fügen von Kupfer mit anderen metallischen Werkstoffen und Schweißen von kupferplattierten Stahlblechen	36
3.5.5	Abbrennstumpfschweißen	15	7.	Schweißsicherheit	38
3.5.6	Widerstandspressschweißen mit Hochfrequenz	15	7.1	Schweißnahtvorbereitung	38
3.5.7	Impulsstrom-Schweißen (Ultrapuls- oder Kurzzeitschweißen)	15	7.2	Schweißzusatzwerkstoffe	41
3.6	Ultraschallschweißen	15	8.	Qualitätssicherung	42
3.7	Reibschweißen	16	9.	Anhang	43
3.8	Rührreibschweißen	16	9.1	Liste der Schweißverfahren	43
3.9	Sprengschweißen	16	9.2	Quellen	44
3.10	Diffusionsschweißen	17	9.3	Normen	47
3.11	Kaltpressschweißen	17	9.4	Verlagsprogramm	49
3.12	Strahlschweißverfahren	18			

1. Einleitung

Kupfer ist ein Werkstoff, der bereits seit tausenden von Jahren auf Grund seiner speziellen Eigenschaften vom Menschen genutzt wird. Da er gelegentlich auch in metallisch reiner Form (gediegen) vorkommt, wurde er schon früh wegen seiner guten Umformbarkeit und seiner Farbe eingesetzt. Kupfer wurde damit zum ersten Gebrauchsmetall des Menschen. Mit der zunehmenden Industrialisierung wurden außerdem noch andere Eigenschaften, z. B. die sehr gute elektrische und

thermische Leitfähigkeit sowie die gute Beständigkeit gegen atmosphärische und vielfach auch chemische Einflüsse, wichtig. Kupfer kann mit vielen verschiedenen Metallen Legierungen bilden, so dass eine Vielzahl von Legierungssystemen vorhanden sind, bei denen bestimmte mechanisch-technologische Eigenschaften wie Härte, Zugfestigkeit, Dehngrenze, chemische Beständigkeit, Verschleißwiderstand und andere Eigenschaften gezielt beeinflusst werden können.

Unter Berücksichtigung der besonderen physikalischen und mechanischen Eigenschaften sind viele Kupferwerkstoffe gut schweißbar. In Abhängigkeit vom eingesetzten Werkstoff sind die entsprechenden Fertigungsparameter wie Schweißverfahren, -zusätze sowie Vor- und Nachbehandlungen zu wählen. Die in Abb. 1 dargestellten Einflussgrößen auf die Schweißbarkeit müssen beachtet und aufeinander abgestimmt werden.

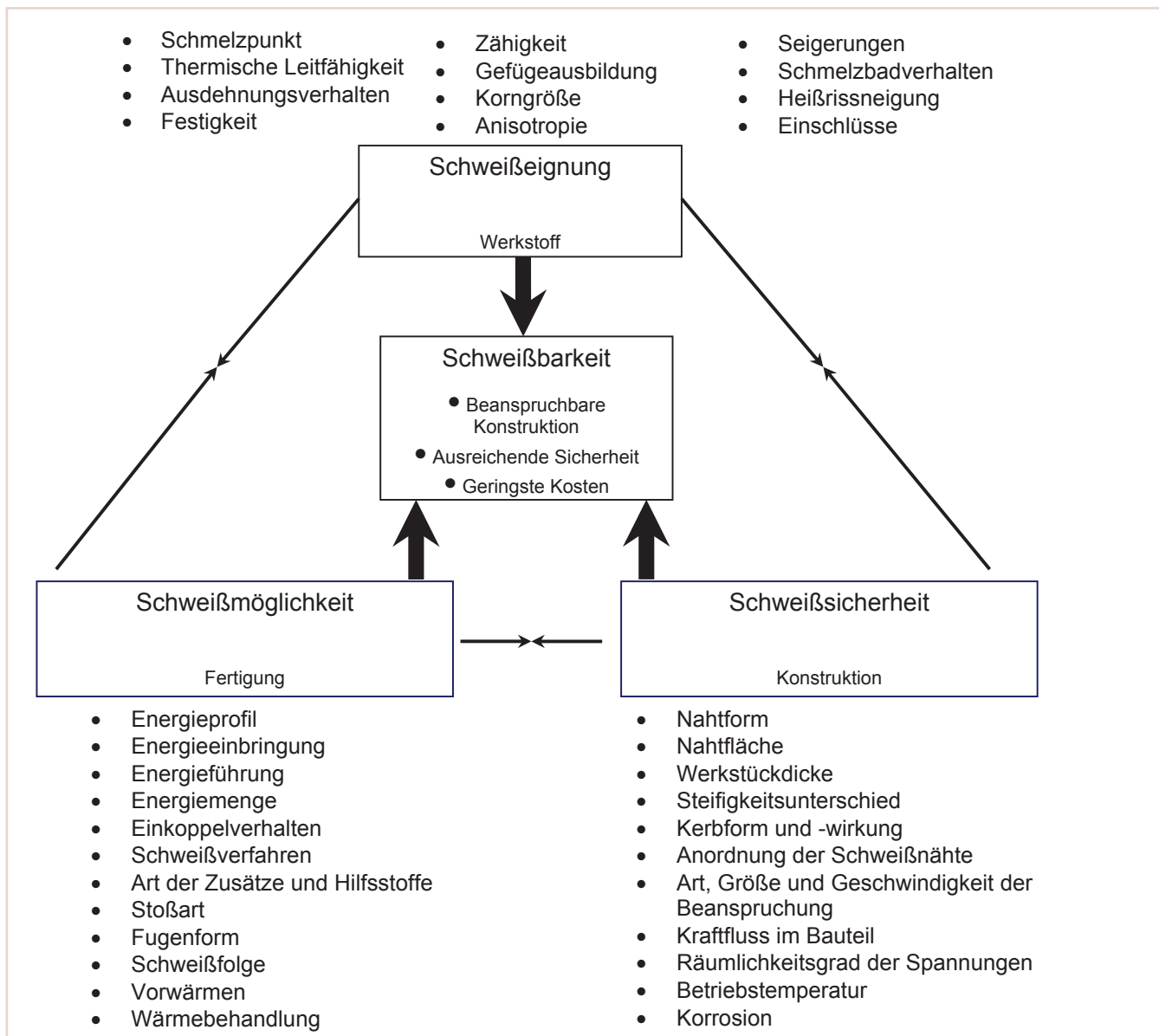


Abbildung 1: Abhängigkeit der Schweißbarkeit

Der vorliegende Informationsdruck gibt den derzeitigen Stand der Technik in der industriellen Anwendung von Kupfer und seinen Legierungen wieder, erhebt jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Da die Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf diesem Gebiet weitergehen, sollte man sich bei Anfragen direkt an die entsprechenden Institute und Einrichtungen wenden. Zwei wichtige thermische Fügeverfahren sind das Schweißen und das Löten. Da die entstandene Verbindung unabhängig vom Herstellungsverfahren die letztendlichen Bauteileigenschaften bestimmt, werden diese beiden Fügeverfahren nach [1] hinsichtlich der chemischen Bindung sowie der chemischen Zusammensetzung des Grund-

rensbeeinflusster Grund- bzw. Grund- und Zusatzwerkstoff) und unbeeinflusstem Grundwerkstoff. Durch Aufschmelzen des Grundwerkstoffes und/ oder thermische Gefügeveränderungen im festen Grundwerkstoff entstehen eine Schmelzlinie und/ oder eine Wärmeinflusszone. Dabei können Schweißnaht, Schmelzlinie und Bindezone identisch sein (siehe Abb. 2). Nach [2] ist die Schweißbarkeit eines metallischen Werkstoffes gegeben, wenn beim Fügen mit einem gegebenen Schweißverfahren unter Einsatz eines geeigneten Fertigungsablaufes der Stoffschluss erzielt werden kann. Die hergestellten Schweißnähte müssen mit ihren Eigenschaften und ihrem Einfluss auf die Gesamtkonstruktion

Das Verbindungsschweißen ist das unlösbare Verbinden zweier oder mehrerer Werkstücke. In der DIN ISO 857-1 sind weiterhin die einzelnen Verfahren zum Schweißen von Metallen mit Prinzipskizzen erklärt. Weitere Begriffe, z. B. Schweißzusatz und Schweißhilfsstoff, sind in DIN 1910-100 definiert. Ein Schweißzusatz ist ein der Schweißstelle zugeführter Werkstoff, der beim Schmelzschweißen in flüssigem Zustand mit dem aufgeschmolzenen Grundwerkstoff zusammenfließt. Hilfsstoffe wie Schweißpulver, Schweißpasten und zum Schweißen verwendete Gase erleichtern oder ermöglichen das thermische Fügen.

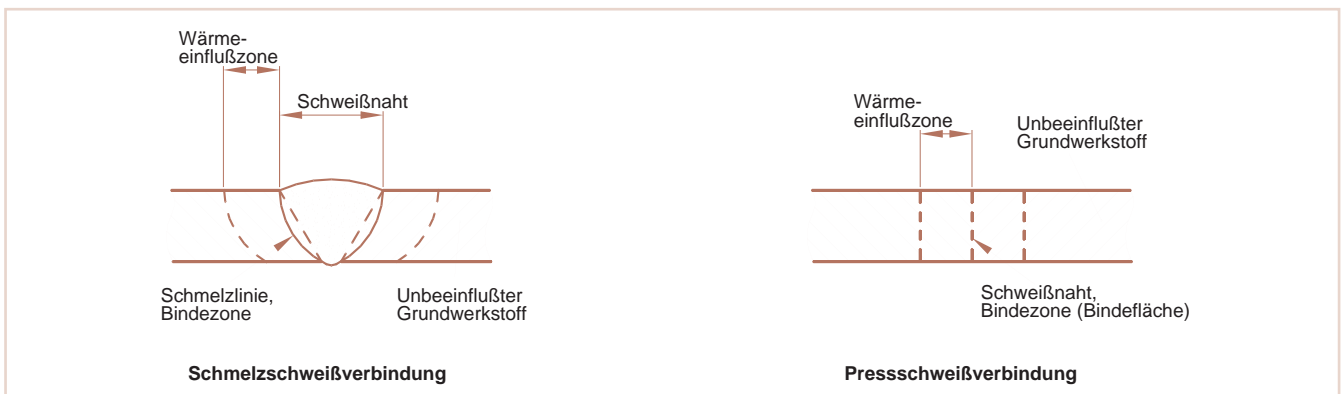


Abbildung 2: Aufbau von Schweiß- und Lötverbindungen

werkstoffes (oder der Grundwerkstoffe) in Bezug auf den Zusatzwerkstoff unterteilt. Sowohl beim Schweißen als auch beim Löten entsteht eine metallische Bindung. Jedoch gibt es bei der chemischen Zusammensetzung Unterschiede. Während eine Schweißverbindung aus Grundwerkstoffen mit gleicher chemischer Zusammensetzung und artgleichem Schweißgut besteht, besitzt eine Lötverbindung durch die Verwendung eines artfremden Zusatzwerkstoffes ein artfremdes Lötgut. Eine Schweißverbindung ist eine unlösbare Verbindung zweier oder mehrerer Werkstücke, die durch Einwirkung von Wärme und/ oder Kraft mit oder ohne Zusatzwerkstoff hergestellt wird. Dabei kann ein nach der obigen Definition artgleicher Zusatzwerkstoff eingesetzt werden. Schweißverbindungen bestehen grundsätzlich aus Schweißnaht, Bindezone (verfah-

die gestellten Anforderungen erfüllen (siehe Abb. 1). [2] Das Metallschweißen wird nach DIN ISO 857-1 unterteilt in Press- und Schmelz- oder Auftrags- und Verbindungsschweißen. Beim Pressschweißen wird eine Verbindung unter Anwendung einer äußeren Kraft, die zu plastischer Verformung an beiden Fügeflächen führt, meist ohne Schweißzusatz erzeugt. Eine mögliche örtlich begrenzte Erwärmung erlaubt oder erleichtert das Schweißen. Schmelzschweißen wird als Schweißen durch Anschmelzen der zu fügenden Flächen ohne Anwendung von Kraft mit oder ohne Schweißzusatz definiert. Dagegen wird beim Auftragschweißen eine Metallschicht auf dem Werkstück erzeugt, um die Abmessungen oder Eigenschaften desselben zu verändern.

Die Lötbarkeit eines Bauteils bezeichnet dessen Eigenschaft, durch eine Lötverbindung die an das Werkstück gestellten Anforderungen zu erfüllen [DIN 8514]. Eine Schweißverbindung an einer Werkstoffkombination bzw. mit artfremden Zusatzwerkstoffen ist wegen der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der Grundwerkstoffe bzw. von Grundwerkstoff und Schweißgut definitionsgemäß eine Lötverbindung. [1]

2. Werkstofftechnische Grundlagen

2.1 Eigenschaften von Kupfer und Kupferlegierungen

Kupfer hat eine Dichte von $8,9 \text{ kg/dm}^3$ und gehört zu den Nichteisen-Metallen. Auf Grund der Kubischflächenzentrierten (kfz)-Gitterstruktur verfügt es über eine sehr gute Tieftemperaturzähigkeit und Kaltverformbarkeit. Durch eine Umformung im kalten Zustand wird eine Festigkeitssteigerung erzielt. Des Weiteren hat Kupfer eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit (Verhältnis elektrischer zu thermischer Leitfähigkeit konstant) und verfügt über eine gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber einer Vielzahl von Medien.

Kupferwerkstoffe werden daher nach dem Behandlungszustand eingeteilt in:

- **Ausscheidungshärtende Werkstoffe** (z. B. CuBe-Legierungen) und
- **Kaltverfestigte Werkstoffe**,

beziehungsweise nach der Werkstoffzusammensetzung in:

- **einphasige Werkstoffe** (z. B. reines Cu) beziehungsweise Legierungen, die vollständig aus Mischkristallen bestehen (z. B. CuNi-Legierungen, einphasiges Messing) und
- **mehrphasige Werkstoffe** (z. B. zweiphasiges Messing) unterteilt. [3]

Im Gegensatz zum Stahl finden bei Kupfer und den meisten seiner Legierungen beim Schweißen keine Gitterumwandlungen statt.

Zur Verbesserung wichtiger werkstofftechnischer Eigenschaften wie beispielsweise Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit wird Kupfer häufig mit Elementen wie z. B. Ni, Mn, Zn, Sn, Al, Fe, Be, Cr und Si legiert. Die so entstandenen Kupferlegierungen können in stärker reduzierenden Medien teil-

weise beständiger sein als austenitische Cr-Ni-Stähle und erreichen ähnliche Festigkeitswerte [3].

2.2 Schweißtechnisch relevante Werkstoffeigenschaften

Kupferwerkstoffe sind unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften ebenso gut schweißbar wie Stahlwerkstoffe. Nachteilig ist jedoch die generelle Neigung der NE-Metalle zur Aufnahme atmosphärischer Gase beim Schweißen, wodurch eine Verschlechterung der mechanisch-technologischen Güterwerte der Schweißnaht eintritt (siehe Kap. 2.5). Deshalb müssen alle Bereiche, in denen während des Schweißens Temperaturen von mehr als 600 K auftreten, mit Hilfe inerte Schutzgase (Schmelzschweißverfahren) bzw. anderer geeigneter Maßnahmen, z. B. durch Beschichtungen (Widerstandsschweißverfahren), vor Luftzutritt geschützt werden. [3]

Weitere, für die schweißtechnische Verarbeitung von Kupfer wichtige Eigenschaften sind die Wärmeleitfähigkeit sowie die Wärmeausdehnung. Im Vergleich zu unlegiertem Stahl hat reines Kupfer

- eine ca. 6-fach höhere Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur (siehe Tab. 1) und eine 15-fach höhere bei 1000 °C [3],
- eine um den Faktor 1,4 höhere Wärmeausdehnung (siehe Tab. 1) [3] und
- eine ca. doppelt so große Schrumpfung beim Erstarren. [79]

Die hohe Wärmeleitfähigkeit führt zu einer Ableitung eines Großteils der eingebrachten Schweißenergie in den umliegenden Grundwerkstoff. Die abgeführte Energie steht zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffes nicht

mehr zur Verfügung. Zur Erzeugung und Aufrechterhaltung des Schmelzflusses muss eine konzentrierte Wärmeeinbringung realisiert oder eine Vorwärmung des Bauteils durchgeführt werden.

Bei der Erwärmung von reinem Kupfer erzeugt das im Vergleich zum Stahl geringere Temperaturgefälle auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit (siehe Abb. 3) eine große Ausdehnung über große Bereiche des Bauteils und damit große Verformungen. Zusätzlich treten beim Erstarren gefügebedingte Schrumpfungen auf.

2.3 Metallurgie des Schweißens

Unlegiertes Kupfer ist einphasig und kann durch Umformung kaltverfestigt werden. Auch die meisten Kupferlegierungen sind in Abhängigkeit der Menge der Legierungselemente einphasig. Sie können bei ausreichender Duktilität ebenfalls kaltverfestigt werden. Durch das Zulegieren von Elementen wie Cr, Ni mit Si oder P oder Sn, Be, Co, etc. können Kupferwerkstoffe ausscheidungsgehärtet werden. Ähnlich wie beim Stahl entsteht bei den Kupferwerkstoffen durch die Wärmeeinbringung neben der Schweißzone ein thermisch beeinflusster Bereich, die Wärmeeinflusszone (siehe Abb. 2). Die entstehende Kornvergrößerung und die Breite dieser Zone sind abhängig von der Höhe der Wärmeeinbringung sowie der Vorwärmtemperatur. Bei Werkstoffen mit einem kfz-Gitter bzw. α -Gefüge (z. B. reines Kupfer) ist das Kornwachstum geringer, da diese Metalle thermisch stabiler sind als Werkstoffe mit einem Kubischraumzentriert krz-Gitter bzw. β -Gefüge (z. B. Kupfer mit 50% Zn). [3]

Werkstoffgruppe	Ausdehnungskoeffizient 10-6/K	elektrische Leitfähigkeit $\text{m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$	Wärmeleitfähigkeit bei 20°C $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ ungefähr N/mm^2	Zugfestigkeit R_m min. N/mm^2	Bruchdehnung A min. %
Cu	17	60	395	40 ... 80	200 ... 250	max. 60
CuZn	18 ... 20,3	15,0 ... 33,3	117 ... 243	60 ... 420	240 ... 460	4 ... 20
CuNiZn	16,5 ... 17	3,5 ... 4,0	27 ... 33	270 ... 580	380 ... 650	0 ... 9
CuSn	18,4 ... 18,5	7,5 ... 10	67 ... 85	220 ... 550	330 ... 620	0 ... 5
CuNi	14,5 ... 17,6	2,04 ... 6,4	21 ... 48	90 ... 500	280 ... 560	0 ... 14
CuAl	17,0 ... 18	5 ... 10	40 ... 83	110 ... 680	350 ... 830	0 ... 25
Stahl, unlegiert	12	5,5 ... 7	48 ... 58	175 ... 355	290 ... 630	18 ... 26

Tabelle 1: Vergleich der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Kupfer, wichtigen Kupferlegierungen und unlegiertem Stahl

Durch das Erhitzen und Abkühlen können unerwünschte Gefüge entstehen. Anfällig dafür sind folgende Werkstoffe:

- Werkstoffe mit Verunreinigungen, die niedrig schmelzende Phasen oder versprödennde Ausscheidungen bilden,
- Ausscheidungshärtende Werkstoffe,
- Legierungen mit einem großen Erstarrungsintervall, die nach dem Schweißen kristallgeseigerte Bereiche aufweisen.

spröderen Phase schlechter kaltumformbar.

Intermetallische Phasen, die sich im Grundwerkstoff befinden oder sich beim Schweißen bilden, sind zu beachten. Sie sind hart und spröde und können Risse verursachen. Vor Allem in mehrfach legierten Werkstoffen besteht die Wahrscheinlichkeit, dass zwei vorhandene Elemente miteinander intermetallische Phasen bilden. [3]

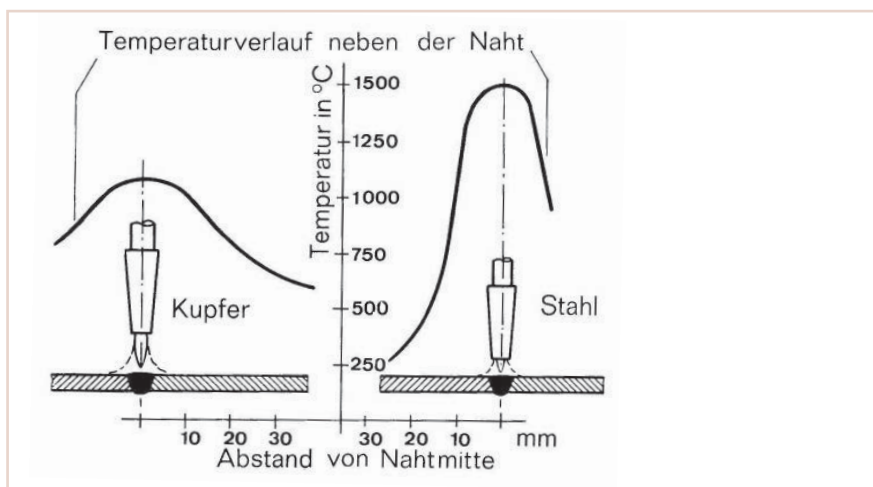


Abbildung 3: Temperaturverlauf beim Schweißen von Stahl und Kupfer (DKI 4668)

Die unerwünschten Gefügeveränderungen im Schweißgut und in der Wärmeeinflusszone lassen sich nur schwer beseitigen. Das dendritische, stengelige Gussgefüge der Schweißnaht bleibt erhalten.

Einphasige Werkstoffe: Diese Werkstoffe sind auf Grund ihrer hervorragenden Zähigkeit in Abhängigkeit des Sauerstoff-Gehaltes im Allgemeinen sehr gut schweißgeeignet. Dagegen sind Werkstoffe mit krz-Kristallgitter schlechter und mit hexagonal-(hdp) Kristallgitter extrem schlecht schweißgeeignet. Beim Schweißen einphasiger Metalle können neben Kornvergrößerung in der Wärmeeinflusszone bei einer bestimmten Menge an nichtlöslichen Verunreinigungen auch Wiederaufschmelzrisse oder Ausscheidungen auftreten. [3]

Mehrphasige Werkstoffe: Die Schweißbarkeit dieser Werkstoffe wird im Allgemeinen durch die schlechter schweißbare Phase bestimmt. Diese Werkstoffe sind im Allgemeinen durch das Vorhandensein mindestens einer

Ausscheidungshärtende Legierungen:

Diese Werkstoffe verfügen im Allgemeinen über eine unbefriedigende Schweißbeignung. Die Ausscheidungsprozesse in der Wärmeeinflusszone führen beim Schmelzen und Wiedererstarren zu ungünstigen Gefügeänderungen. Die beim Erhitzen gelösten festigkeitssteigernden Teilchen scheiden sich beim Abkühlen in ungünstiger Form oder nicht vollständig, vorrangig an den Korngrenzen, aus. Diese inhomogene Verteilung führt zu Festigkeits-, Härte- sowie Zähigkeitsverlusten [3]. Bei mehrfach legierten Werkstoffen besteht außerdem die Gefahr, dass sich bei rascher Erwärmung niedrig schmelzende Phasen und/ oder Eutektika bilden, die zu Wiederaufschmelzrisse in der Wärmeeinflusszone führen können. Zur Verhinderung dieses Prozesses muss die Wärmeeinbringung minimiert werden. Diese Maßnahme begünstigt jedoch hohe Eigenspannungszustände und damit Risse in den ausgehärteten, schwer verformbaren Werkstoffen [3]. Durch eine zu große Wärmeeinbringung

wird der optimale Ausscheidungszustand zerstört. Es sinken die Zähigkeits- und Festigkeitswerte im Bereich der Wärmeeinflusszone. Durch geeignete Zusatzwerkstoffe und eine kontrollierte Wärmeeinbringung, deren Höhe vor der Schweißfertigung experimentell bestimmt werden sollte, wird der Verlust an Zähigkeit und Festigkeit begrenzt. Bei hohen Anforderungen an die mechanischen Gütewerte ist eine umfangreiche Wärmebehandlung mit Lösungsglügen, Abschrecken und Auslagern erforderlich. Diese Verfahren sind jedoch aufwändig und auf Grund der Bauteilgröße oft nicht realisierbar [3].

Kaltverfestigte Werkstoffe: Bei kaltverfestigten Werkstoffen geht bei einer Erwärmung über die Rekristallisationstemperatur, vor Allem bei Schweißvorgängen, die Verfestigung verloren. Die Festigkeitskennwerte sinken auf das Niveau des unverformten Werkstoffs. Je länger der Werkstoff im Rekristallisationsgebiet gehalten wird, das heißt je größer die Wärmeeinbringung ist, desto größer werden die Wärmeeinflusszone und der Härteabfall. Deshalb sollte die eingebrachte Wärmemenge so gering wie möglich sein.

2.4 Einteilung nach Sauerstoffgehalt

Die chemische Zusammensetzung der einzelnen Kupfer-Sorten ist in der DIN EN/TS 13388 festgelegt.

Der Sauerstoff-Gehalt im Kupfer hat einen entscheidenden Einfluss auf die Schweißbarkeit. Anhand dieses Kriteriums sollte die Schweißbeignung dieser Werkstoffe bewertet werden. Sauerstoff wird zur Oxidation von Verunreinigungen, die die Leitfähigkeit mindern, während der Raffination zugegeben und ist vorrangig in den elektrisch hochleitfähigen Kupfer-Sorten zu finden, die in der Elektrotechnik und Elektronik genutzt werden. Dieser Sauerstoff-Gehalt im Kupfer bewirkt bei zusätzlicher Aufnahme von Wasserstoff die so genannte Wasserstoffkrankheit. Um diese Gefahr zu verhindern, müssen Maßnahmen getroffen werden, die letztendlich die Schweißbarkeit herabsetzen. Kupfersorten, die im Apparate- und Behälterbau eingesetzt werden, sind meist mit Phosphor zum Binden von Sauerstoff desoxidiert. Diese Behand-

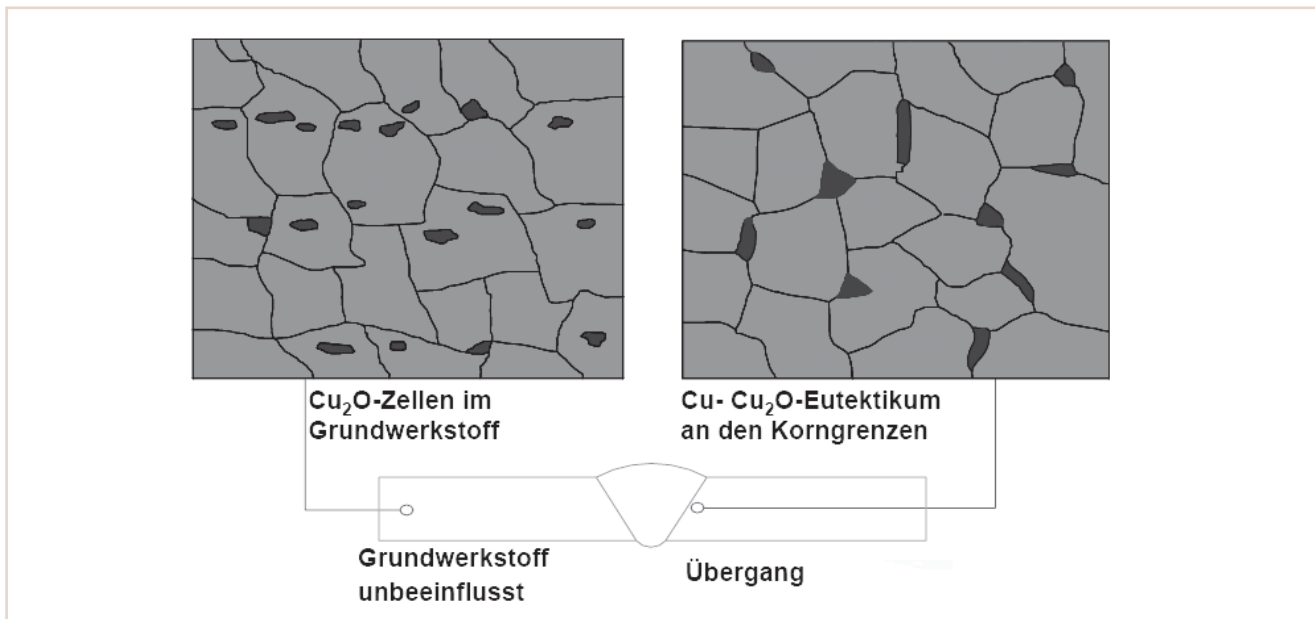


Abbildung 4: Sauerstoffhaltiges Kupfer – Cu_2O -Verteilung im Grundwerkstoff und im Übergang zur Schweißnaht (DKI 4670).

lung wirkt sich positiv auf die Schweißbarkeit, jedoch negativ auf die Leitfähigkeit aus. Bei diesen Werkstoffen sind jedoch die Festigkeits- und Dehnungseigenschaften sowie das Korrosionsverhalten wichtiger. Sauerstoffhaltige Kupfer-Sorten sind nicht oder nur unter besonderen Bedingungen schmelzschweißbar. Durch die Gefahr der Bildung spröder Gefügephasen, z. B. des $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ -Eutektikums, und die Reaktion von Cu_2O mit Wasserstoff können Risse entstehen („Wasserstoffkrankheit“, siehe Kap. 2.5). Deshalb empfiehlt es sich, bei Schmelzschweißkonstruktionen sauerstofffreie Kupfer-Sorten zu verwenden [79].

2.5 Gasaufnahme

Im flüssigen Zustand neigt Kupfer dazu, Gase aus der Atmosphäre, z. B. Sauerstoff oder Wasserstoff, aufzunehmen. Sauerstoff ist im Kupfer im festen Zustand bei der Erstarrungstemperatur des Eutektikums (1065 °C) lediglich zu $0,09\%$ löslich. Bereits bei geringen Mengen wird durch die eutektische Reaktion der Restschmelze Cu(I) -Oxid (Cu_2O) gebildet. Diese spröde Phase scheidet sich weitgehend im interdendritischen Bereich an den Korngrenzen ab (siehe Abb. 4) und verringert die Schweißnahtzähigkeit [79].

Im Gegensatz dazu kann Kupfer sowohl im flüssigen als auch im festen Zustand Wasserstoff lösen. Dessen Eindringen in den hochoverhitzten, sauerstoffhaltigen

Werkstoff führt zur Reduktion des an Sauerstoff gebundenen Kupfers unter Bildung von Wasserdampf, der beim Abkühlen auf Grund der Größe seiner Moleküle nicht wieder nach außen diffundieren kann und zunächst unter hohem Druck im festen Gefügeverbund eingeschlossen bleibt. Durch Aufweitung der Korngrenzen verschafft er sich einen Ausweg. Gefügelockerung wird als „Wasserstoffkrankheit“ bezeichnet. [79] Diese Erscheinung tritt hauptsächlich beim Autogenschweißen auf. In Abb. 5 unten ist dieser Effekt dargestellt. Beim Schutzgasschweißen von sauerstoffhaltigem Kupfer mittels WIG- und MIG-Verfahren entstehen besonders in der Nähe der Übergangszone von der

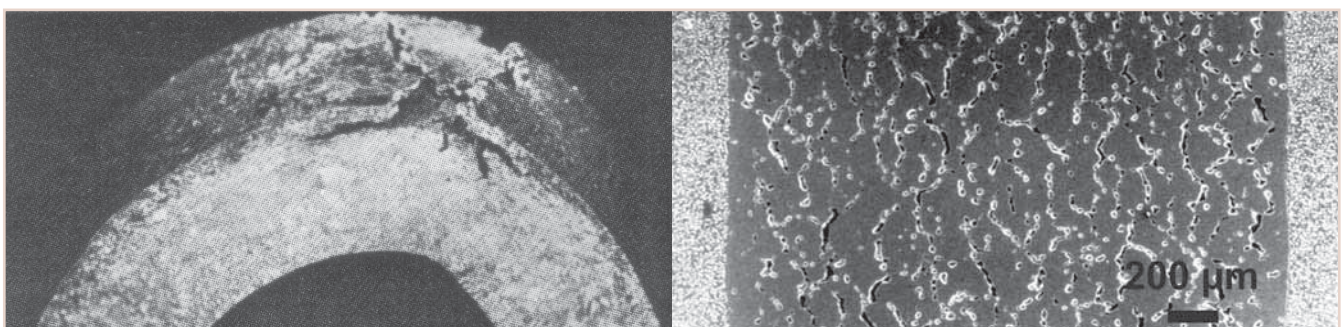


Abbildung 5: Wasserstoffkrankheit – links: Aussehen einer Biegeprobe – rechts: Wasserstoffkranke Zone mit $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ -Korngrenzen-Eutektikum (DKI 3936)

Schweißnaht zum Grundwerkstoff spröde Gefügesäume mit Cu-Cu₂O-Eutektikum an den Korngrenzen (siehe Abb. 4). Bei hohen Anforderungen an die Festigkeitseigenschaften der Schweißnaht sind sauerstoffhaltige Kupfer-Sorten deshalb nicht geeignet. In diesen Fällen muss sauerstofffreies, mit Phosphor desoxidiertes oder sauerstofffreies, nicht desoxidiertes Kupfer eingesetzt werden.

2.6 Wirkung von Legierungselementen

Legierungselemente haben einen großen Einfluss auf die Schweißbeignung von Kupfer und Kupferlegierungen. Chemische Elemente, die Mischkristalle mit Kupfer bilden, senken bereits in kleinen Mengen die elektrische und thermische Leitfähigkeit stark, wohingegen unlösliche Elemente wie Pb oder S die Leitfähigkeit nur durch die Querschnittsverminderung des Leiters beeinflussen. Die hohe Leitfähigkeit

des unlegierten Kupfer wirkt sich negativ auf die Schweißbeignung aus. Da Legierungselemente generell mit zunehmender Menge die Leitfähigkeit senken (siehe Abb. 6), sind Kupferlegierungen in dieser Hinsicht besser schweißgeeignet als unlegiertes Kupfer.

Bleihaltige Legierungen sind jedoch nur bis zu einem Gehalt von < 0,03 % als uneingeschränkt schweißgeeignet zu bezeichnen, da auf Grund der Unlöslichkeit im Kupfer und des niedrigen Schmelzpunktes (327 °C) beim Schweißen Warmrisse entstehen. Schwefel führt beim Schmelzschweißen zu einer Versprödung der Naht. Chemische Elemente wie Mn und P, die als Oxidationsmittel eingesetzt werden, verbessern dagegen die Schweißbeignung. Mn bindet außerdem S, so dass diese Legierungen gut schweißbar sind. Die Wirkung weiterer Elemente ist in Tab. 2 zusammengefasst.

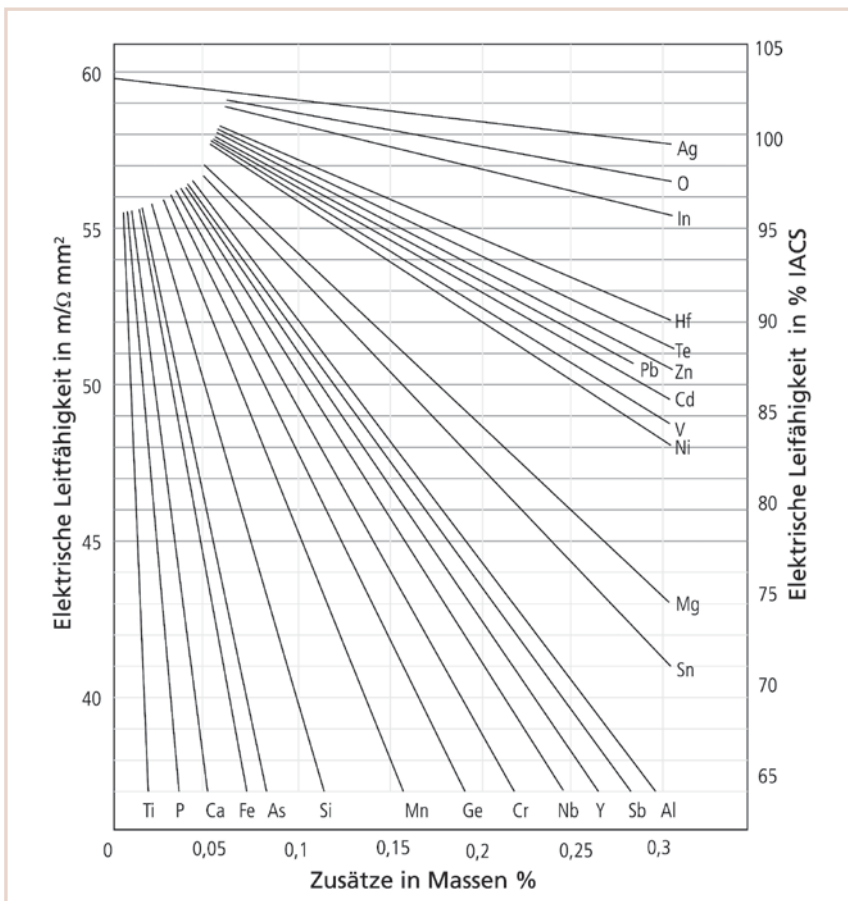


Abbildung 6: Einfluss der Legierungselemente auf die elektrische Leitfähigkeit [63]

Element	Besonderheiten	Rekristallisations- temperatur		Oxid- bildung	Elektrische Leitfähig- keit	Wärme- leitfähigkeit	Korrosions- beständig- keit	Warm- festigkeit	Festigkeit/ Härte	Verschleiß- festigkeit	Dehngrenze	Farb- änderung
		O ₂ - haltig	O ₂ - frei									
Ag	Erhöhung Zeitstandfestigkeit	↑	↑	nein	→	→		↑	↑			
Al				ja	↓	↓	↑	↑	↑			
As	Ermöglichen der Aushärtbarkeit	↑	↑	nein	↓↓	↓↓						
Be	Ermöglichen der Aushärtbarkeit			nein	↓↓	↓↓		↑	↑↑		↑	
Co		-	→	nein	↓↓	↓↓						
Cr	Ermöglichen der Aushärtbarkeit	-	↑	nein	↓↓	↓↓		↑	↑			
Fe	kornfeinende Wirkung, begrenzte Löslichkeit, Ermöglichen der Aushärtbarkeit, Verbesserung Gleiteigenschaften	→	leicht ↑	ja	↓↓	↓↓	↑	↑	↑			
Mn	Desoxidation, Abbinden Schwefel, Verbesserung Gießeigenschaften (mit Si und Al)			nein	↓↓	↓↓		↑	↑	↑ (mit Al und Si)		
Ni	Erhöhung Dauerschwingfestigkeit, Anlaufbeständigkeit, gute Verformbarkeit, Erhöhung Schmelztemperatur, in Verbindung mit anderen Elementen (z. B. P, Si) Ermöglichen der Aushärtbarkeit	→	→	nein	↓	↓	↑	↑	↑			x
O ₂	Oxidation unerwünschter Verunreinigungen, Mischkristallbildung	→	-	ja	↓↓	↓↓						
P	Mischkristallbildung, Desoxidation, Verbesserung Gießbarkeit und Gleiteigenschaften, Verschlechterung Warmformbarkeit	↑	leicht ↑	nein	↓↓	↓↓						
Pb	spannbrechende Wirkung, Unlöslichkeit, Erhöhung Warmrissempfindlichkeit, Verschlechterung Warmformbarkeit	↑	leicht ↑	nein	↓	↓					↓ bei Temp. ↑	
S	Unlöslichkeit	→	→	ja	↓	↓					↓ bei Temp. ↑	
Sb	häufig vorkommende Verunreinigung	↑	↑	nein	↓↓	↓↓					↓ bei Temp. ↑	
Se	Unlöslichkeit	leicht ↑	leicht ↑	nein	↓	↓					↓ bei Temp. ↑	
Si	Mischkristallbildung, Desoxidation, Ermöglichen der Aushärtbarkeit	-	↑	nein	↓↓	↓↓						
Sn	gute Verformbarkeit	→	↑	nein	↓	↓	↑	↑	↑			x
Te	Unlöslichkeit, gute Zerspanbarkeit	leicht ↑	leicht ↑	nein	↓	↓		↑			↓ bei Temp. ↑	
Zn	Verbesserung Verformbarkeit, Desoxidation	-	↑	ja	→	→	↑	↑	↑		↑ bis 37 % Zn, darüber ↓	
Zr	geringe Kerbempfindlichkeit			nein	↓	↓		↑				

→ bleibt annähernd gleich

↑ steigt

↑↑ steigt stark

↓ sinkt

↓↓ sinkt stark

nicht ausgefüllte Spalten: keine Informationen vorhanden

Tabelle 2: Wirkung von Legierungselementen von Kupferwerkstoffen

3. Schweißverfahren

3.1 Besonderheiten bei der schweißtechnischen Verarbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen

Für die schweißtechnische Verarbeitung von Kupferwerkstoffen steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung. Diese sind im folgenden Kapitel aufgeführt. Die Bezeichnungen und Ordnungsnummern der Schweißprozesse sind der DIN EN ISO 4063 entnommen. Eine Liste der Schweißverfahren finden im Anhang.

Auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit besonders der un- und einiger niedriglegierter Kupferwerkstoffe sollten entweder Verfahren mit einer hohen Energiedichte, z. B. das Laser- oder Elektronenstrahlschweißen, eingesetzt oder die Werkstücke vorgewärmt werden. Die Höhe der Vorwärmtemperatur richtet sich dabei nach der Leitfähigkeit des jeweiligen Werkstoffes und der Bauteilgröße [80]. Zur Gewährleistung der Herstellung von sauberen und fehlerfreien Schweißnähten und als Schutz der Wurzelseite können Flussmittel eingesetzt werden. Sie werden vor dem Schweißen auf die Werkstückoberfläche aufgebracht, lösen während der Erwärmung die vorhandenen Oxidschichten und verhindern deren Neubildung. Sie sind meist pastös und bestehen aus Borverbindungen mit Zusätzen von oxidlösenden Metallsalzen (für CuAl-Legierungen fluoridhaltige Sonderflussmittel [80], siehe Kap. 5.3.8). Ihre Verwendung beschränkt sich auf die konventionellen Schmelzschweißverfahren wie Autogen-, Lichtbogenhand- und WIG-Schweißen. Für Gas- und Lichtbogenhandschweißen müssen sie immer eingesetzt werden. Beim WIG-Schweißen kommen Flussmittel jedoch nur noch selten und beim MIG gar nicht mehr zum Einsatz [42], auch wenn sie allgemein für das Schutzgasschweißen empfohlen werden. Für Arbeiten mit hohen Vorwärmtemperaturen (ab ca. 300 °C [42]) sollten sie als Kantenschutz der Schweißflanken eingesetzt werden. Bei mehrlagigen Schweißungen (Blechdicke > 10 mm) ist es vorteilhaft, auch die Zusatzwerkstoffe dünn mit Flussmittel zu bestreichen.

Die oberflächenreinigende Wirkung der Flussmittel kann durch den Einsatz des Lichtbogens z. B. verstärkt oder ersetzt

werden. Beim Schweißen von aluminiumhaltigen Kupferlegierungen wird durch das Anlegen der Elektrode an den Pluspol eine Reinigung der Oberfläche von den dichten und festhaften Al-Oxidschichten erzielt. Die Elektrode wird bei dieser Technik durch die hohe Geschwindigkeit der auftretenden Elektronen thermisch stark belastet, weshalb meist Wechselstrom angewendet wird. Durch die negativen Stromanteile sinkt die thermische Belastung der Elektrode, während die gewünschte Reinigungswirkung in den positiven Phasen statt findet.

3.2 Gasschweißen

Beim Gasschweißen (311) entsteht der Schmelzfluss durch unmittelbares, örtlich begrenztes Einwirken einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme. Im Unterschied zum Schweißen von Stahlwerkstoffen muss wegen der hohen erforderlichen Wärmeeinbringung eine größere Düse eingesetzt werden. Schweißwärme und -zusatzwerkstoff werden getrennt zugeführt. Um die Wirtschaftlichkeit zu steigern und den Bauteilverzug zu verringern, kann für Stumpfnähte an Bauteilen ab ca. 5 bis 6 mm Wandstärke das gleichzeitig-beidseitige Schweißen in steigender Position angewendet werden.

In Abhängigkeit der Blechdicke ist je nach Leitfähigkeit des Kupferwerkstoffes ein Vorwärmen zwischen 300 und 600 °C notwendig. Es wird ebenfalls mit der gleichen Gerätetechnik durchgeführt. Beim Fügen von Kupferwerkstoffen müssen immer Flussmittel eingesetzt werden, die im Allgemeinen sowohl auf die Nahtfugen als auch auf die Schweißstäbe gestrichen werden. Es sind auch Schweißzusätze mit Flussmittelumhüllung oder Flussmittelfüllung erhältlich.

Das Gasschweißen hat den Vorteil, dass es unabhängig von der Stromversorgung anwendbar und die Gerätetechnik einfach und preiswert ist. Das Verfahren ist jedoch nur schwer mechanisier- und automatisierbar. Aus diesem Grund wird es hauptsächlich manuell angewendet. Durch die geringe Energiedichte und die damit verbundenen hohen Fertigungszeiten und den hohen Fertigungsaufwand ist es jedoch nicht wirtschaftlich. Die Güte der Naht, deren Festigkeitswerte

geringer als die des Grundwerkstoffs sind, ist stark von den Fertigkeiten des Schweißers abhängig. Zur Verbesserung der Festigkeit können die einzeln gefertigten Nahtabschnitte in der Rotwärme (über 700 °C) hammervergütet werden (siehe Kap. 3.15) [79]. Dabei wird das entstandene Gussgefüge der Schweißnaht in feinkörnigeres Gefüge umgewandelt [79].

Auf Grund der aufgeführten Nachteile hat das Autogenschweißen bei Kupferwerkstoffen in den letzten Jahren stark an Bedeutung verloren und wird nur noch sehr selten, z. B. zu Reparaturzwecken, eingesetzt.

3.3 Lichtbogenhandschweißen

Das Verfahren (111) nutzt eine manuell geführte, abschmelzende, meist positiv gepolte Stabelektrode. Durch Berühren des Werkstücks mit der Elektrode wird ein Lichtbogen im Kurzschluss gezündet. Es sollte mit weichem, energiearmem Lichtbogen geschweißt werden. Zur Erstarrung des Schweißgutes muss wegen der niedrigen Schweißtemperatur nur wenig Wärme abgegeben werden, so dass diese bei Werkstücken mit sehr kleinem Schmelzintervall abrupt erfolgt. Schmelzbad und Lichtbogen sind durch Schlacken und Gase aus der Elektrodenumhüllung vor Atmosphärenzutritt geschützt. Die für Kupferwerkstoffe anwendbaren Elektroden sind in der nicht mehr gültigen Norm DIN 1733-1 aufgeführt. Ein neuer Normentwurf für umhüllte Stabelektroden ist geplant.

In Abhängigkeit der Leitfähigkeit der Kupferwerkstoffe ist eine Vorwärmung bis ca. 500 °C (unlegiertes Kupfer) erforderlich. Es sind ebenfalls immer Flussmittel notwendig, die z. B. in der Elektrodenumhüllung enthalten sein können.

Die Wärmeleistung der Elektroden ist wegen der begrenzten Strombelastbarkeit für Kupferwerkstoffe in der Regel zu gering, um eine ausreichende Aufschmelzung zu erzielen. Deshalb muss vorgewärmt werden.

Der Einsatz des Lichtbogenhandschweißens für Kupferwerkstoffe ist daher auf wenige Anwendungsbereiche, z. B. Instandsetzungsschweißungen und Restaurationsarbeiten, beschränkt.

3.4 Schutzgasschweißen

3.4.1 Allgemeines

Die Schutzgasschweißverfahren (13) WIG und MIG haben für die schweißtechnische Verarbeitung von Kupfer außer im Elektronikbereich die größte Bedeutung erlangt und werden am häufigsten eingesetzt [42], [80]. Schutzgasschweißen ist der Oberbegriff für alle Lichtbogenschweißverfahren, bei denen die Elektrode, der Lichtbogen und das Schmelzbad durch ein Schutzgas gegen die Atmosphäre abgeschirmt sind.

gesteigert werden (siehe Abb. 7). Nachteil ist der hohe Preis dieses Edelgases. Deshalb wird meist ein Ar-He-Gemisch eingesetzt. Mit den zur Anwendung kommenden Schweißzusätzen werden auf Grund der Legierungszusammensetzung sowie der guten Homogenität des Schweißguts Verbindungen erzeugt, deren Festigkeitseigenschaften denen von weichgeglühtem Kupfer entsprechen oder diese übersteigen. Das WIG-Schweißverfahren liefert im Gegensatz zum MIG-Verfahren qualitativ hochwertigere, insbesondere

Gleichstrom und negativ gepolter Elektrode durchgeführt [4], Wechselstrom ist möglich. Das Zünden beim WIG-Schweißen wird mittels Hochspannungsanregung realisiert, da ein Aufsetzen der Elektrode zu deren Verschmutzung führen und die Lichtbogenzündung verschlechtern würde. Mit neueren Technologien ist auch ein berührendes Zünden mit stark reduziertem Kurzschlussstrom (Lift-Arc-Technik) möglich [4]. Als Schutzgase werden Ar, He und Ar-He-Gemische (ca. 50/50) eingesetzt. Das WIG-Schweißen kann sowohl mit als auch

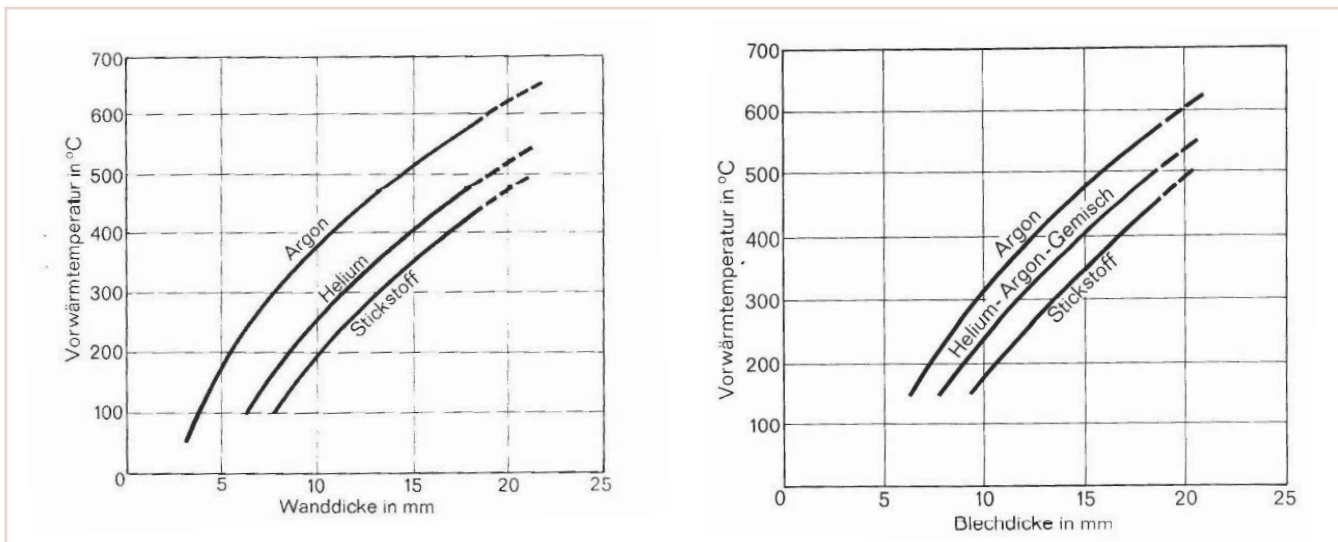


Abbildung 7: Notwendige Vorwärmtemperaturen beim WIG- und MIG-Schweißen in Abhängigkeit des verwendeten Prozessgases [22] (DKI 578) (DKI 611)

Zur Verhinderung einer Schmelzbadreaktion mit Luftsauerstoff werden inerte Schutzgase wie Ar, aber auch ArHe- oder ArN-Gemische verwendet (siehe DIN EN ISO 14175). Die Art des Schutzgases spielt für die schweißtechnische Verarbeitung eine wichtige Rolle. He hat gegenüber Ar eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit und benötigt eine höhere Lichtbogenspannung zur Gewährleistung der notwendigen Ionisierungsenergie. Im Vergleich zum Schweißen mit reinem Ar entstehen ein heißeres Schmelzbad mit geringerer Viskosität und ein tiefer, gleichmäßiger Einbrand. Auf Grund der veränderten Schmelzbadbewegung wird eine bessere Entgasung erreicht und es werden porenärmere Nähte erzeugt. Durch den Einsatz von He kann außerdem die Vorwärmung deutlich reduziert oder die Schweißgeschwindigkeit

porenärmere Nähte. Das MIG-Verfahren wird zum Ausbringen größerer Mengen an Zusatzwerkstoff eingesetzt. Die Wärmeeinbringung ist im Vergleich zum WIG-Verfahren höher. Damit sind höhere Schweißgeschwindigkeiten möglich. Beide Verfahren müssen bei einem Einsatz für Arbeiten im Freien vor Zugluft geschützt werden, da es sonst zur Störung des Schutzgasmantels und in Folge dessen zu starker Porenbildung kommen kann.

3.4.2 WIG-Schweißen

Bei diesem Verfahren (141) brennt der Lichtbogen frei zwischen einer nicht abschmelzenden Wolfram-Elektrode und dem Werkstück. Zusatzwerkstoff und Lichtbogen werden dem Prozess getrennt zugeführt. Das Verfahren wird bei Kupferwerkstoffen vorrangig mit

ohne Zusatzwerkstoff ausgeführt werden.

In Abhängigkeit der Bauteilgröße und der Leitfähigkeit der Kupferwerkstoffen ist ein Vorwärmen bis zu 600 °C erforderlich. Mit Schweißgeräten, die einen Schweißstrom von 500 A liefern, kann es sogar entfallen [5]. Die Anwendung von Flussmitteln wird für das WIG-Schweißen empfohlen, jedoch werden diese auf Grund des zusätzlichen Fertigungsaufwands nur noch selten genutzt. Vorteilhaft ist ihre Anwendung vor Allem beim Arbeiten mit hohen Vorwärmtemperaturen ab ca. 300 °C [42]. Sie werden dann als Kantenschutz der Nahtflanken verwendet. Beim Schweißen mehrerer Lagen sollten die Schweißstäbe ebenfalls mit Flussmittel bestrichen werden. Eine Teil- oder Vollmechanisierung oder Automatisierung des Verfahrens

ist sehr gut möglich. Beim vollmechanischen und automatisierten Schweißen müssen Führungs- und Haltevorrichtungen der Werkstücke und die Nahtvorbereitung exakt sein, um ein Verschmutzen der Elektrode durch Aufsetzen auf das Werkstück zu vermeiden. Bei Verwendung eines Zusatzwerkstoffes ist eine gesonderte Drahtzufuhr-Einrichtung notwendig. Die Vorteile dieses Verfahrens bestehen in der hohen Qualität der erzeugten Schweißnähte und der guten Nahtoberfläche sowie der Spaltüberbrückbarkeit. Es zeichnet sich außerdem durch die im Vergleich zum Auto- und Lichtbogenhandschweißen hohen Schweißgeschwindigkeiten, durch beidseitig saubere Nahtoberflächen und porenarme Schweißnähte aus und ist sehr gut für das Arbeiten in Zwangslagen geeignet [4]. Durch die stabile Bogenentladung handelt es sich um einen ruhigen Schweißprozess mit einer geringen Spritzerbildung. Auf Grund der konzentrierten Wärmeeinbringung durch den Lichtbogen wird weniger Wärme in das Bauteil eingebracht als beim Gas- und Lichtbogenhandschweißen, was sich in einer schmaleren Wärmeeinflusszone bemerkbar macht. Auf Grund der Trennung von Schweißzusatz und Brenner können Wärmeeinbringung und Abschmelzleistung einzeln verändert werden, weshalb die Gefahr von Bindefehlern im Vergleich zum MIG-Schweißen verringert ist. Das WIG-Schweißen wird deshalb häufig für das Schweißen der Wurzellage bei mehrlagigen Nähten verwendet. Durch die im Vergleich zum MIG-Schweißen geringere Abschmelzleistung und die daraus resultierende geringere Produktivität wird es außerdem vorrangig für besonders hochwertige Nähte und geringe Blechdicken verwendet. Bei poren- oder oxidationsanfälligen Werkstoffen muss dabei auf einen entsprechenden Wurzelschutz geachtet werden [4]. Das automatisierte WIG-Schweißen wird vorteilhaft bei der Herstellung längsnahtgeschweißter kupferner Kabelmäntel mit einer Wanddicke von etwa 0,5 mm aus Kupfer-Walzband oder zur Herstellung endloser dünnwandiger Rohre aus strukturierten Kupfer-Bändern ohne Zusatzwerkstoff

angewendet. Außerdem wird es häufig im Apparate-, Behälter- und Rohrleitungsbau sowie in der Luft- und Raumfahrt oder in der Reaktortechnik eingesetzt [4], [7].

Mögliche Verfahrensvarianten sind WIG-Heißdraht-, -Impulslichtbogen-, -Punkt- und -Orbitalschweißen. Beim **WIG-Heißdrahtschweißen** wird über eine zweite Stromquelle der Zusatzwerkstoff erhitzt. Die Lichtbogenenergie kann somit vollständig zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffs genutzt werden. Mit dem **WIG-Impulslichtbogen** werden vorrangig dünnere Bleche mit verbessertem Schweißnahtaussehen und niedrigerer Leistung verbunden. Es ist außerdem das Schweißen von Werkstoffen mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit bzw. Wärmeableitung (Dickenunterschiede) möglich [8]. Auf Grund der geringen Wärmeeinbringung ist das Schmelzbad viskos und kann gut modelliert werden. Das ist besonders bei Zwangslagenschweißungen mit Spaltüberbrückung von Vorteil. [76] Das **WIG-Orbitalschweißen** wird für mechanisierte Rohrschweißungen eingesetzt. Der Brenner wird dazu mit einer Vorrichtung am Rohr befestigt und zum Schweißen um das Rohr bewegt.

3.4.3 MIG-Schweißen

Beim MIG-Schweißen (131) brennt der Lichtbogen zwischen einer abschmelzenden Elektrode, die gleichzeitig den Schweißzusatz bildet, und dem Werkstück. Das Verfahren wird ausschließlich mit Gleichstrom und positiv gepolter Elektrode angewendet. Durch die hohe und im Vergleich zum WIG-Schweißen direkte Strombelastung der Elektrode schmilzt diese leichter und schneller ab, so dass mit dem Zusatzwerkstoff zusätzlich Wärme in das Schmelzbad eingebracht wird [7]. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt berührend. Die verwendeten Schutzgase sind Ar, aber auch ArHe- (ca. 50/50) oder ArN-Gemische (< 30 % N bei Sprühlichtbogen, siehe DIN EN ISO 14175) [42]. Ein Vorwärmen ist nur bei höheren Bauteildicken erforderlich. Es werden keine Flussmittel eingesetzt [42]. Das MIG-Verfahren ist sehr gut automatisierbar, kann aber auch voll- oder teilmechanisiert ausgeführt werden.

Die kontrollierte, niedrige Wärmeeinbringung senkt beim Schweißen von heißrissempfindlichen Werkstoffen mit großen Bauteildicken die Gefahr der Heißrissebildung und verringert den Verzug.

Ein weiterer Vorteil des MIG-Schweißens ist die selbsttätige Stromregelung, die auch als „Innere Regelung“ bezeichnet wird. Wenn der Abstand zwischen Werkstück und Elektrode größer wird, sinkt auf Grund des höheren Widerstandes im Lichtbogen die Stromstärke und auf Grund dessen die Abschmelzleistung. Durch die kontinuierliche Drahtvorschubgeschwindigkeit wächst das freie Drahtende, bis sich der ursprüngliche Abstand zum Werkstück wieder einstellt. Bei einer geringeren Lichtbogenlänge sinkt der Widerstand im Lichtbogen und die Stromstärke sowie die Abschmelzleistung steigen und das freie Drahtende wird kürzer. Mit dieser Regelung können beim vollmechanisierten und automatisierten MIG-Schweißen Oberflächenunebenheiten sowie Ungenauigkeiten bei der Werkstückpositionierung in z-Richtung und beim teilmechanisierten Schweißen Abstandschwankungen auf Grund der manuellen Brennerführung ausgeglichen werden.

Beim MIG-Schweißen werden mehrere Lichtbogenarten unterschieden, die durch den Werkstoffübergang definiert sind. Der Lichtbogentyp beeinflusst den Materialübergang sowie die Spritzerbildung beim Schweißen. Die Spritzerbildung tritt vorrangig bei den mit geringen Stromstärken arbeitenden, kurzschlussbehafteten Kurz- und Übergangslichtbögen auf. Mit zunehmender Stromstärke nimmt die Tropfengröße ab und die Kurzschlussgefahr sinkt. Der Werkstoffübergang bei den leistungsintensiven Lichtbögen, Sprüh- und Impulslichtbogen, ist meist feintropfig und die Wahrscheinlichkeit von Spritzern gering. [4] Die letztgenannten Lichtbogenarten werden vorrangig für das Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen verwendet [7]. Der **Sprühlichtbogen** arbeitet mit den höchsten Lichtbogenleistungen, so dass der Werkstoffübergang immer kurzschlussfrei und ohne Spritzer erfolgt. Durch die hohe erreichbare Abschmelzleistung wird er für Füll-

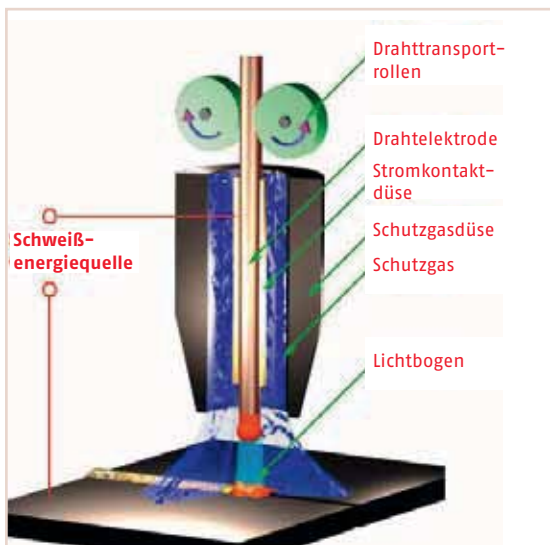


Abbildung 8: MIG-Schweißen

und Decklagen eingesetzt [4]. Auf Grund der hohen Wärmeeinbringung ist das Schmelzbad überhitzt und dünnflüssig und kann nur in den Positionen PA und PF verschweißt werden. Es entstehen sehr glatte und flache Nähte [7].

Beim **Impulslichtbogen** wird mit einem dem Grundstrom überlagerten Impulsstrom gearbeitet. Der Grundstrom wärmt Werkstück und Elektrodenende vor und hält die Ionisation der Lichtbogenstrecke aufrecht. Der Impulsstrom dient der Tropfenablösung. Ar wird hier auf Grund der im Vergleich zu He höheren Lichtbogenstabilität als Schutzgas eingesetzt. [7] Da Grund- und Impulsstrom sowie die Impulsdauer bzw. -frequenz frei eingestellt werden können, entstehen auch bei kleinen Lichtbogenleistungen nur selten Spritzer. Es lassen sich dünne Bleche auch mit dickeren Elektroden verschweißen [4]. Außerdem ist dieser Lichtbogentyp gut für das Arbeiten in Zwangslagen geeignet. Die in weiten Grenzen steuerbare Wärmeführung erlaubt die Optimierung von Schweißbedingungen für das Auftragschweißen von Kupferwerkstoffen auf Stahlwerkstoffe, wobei Aufmischungsgrad und Kupfer-Eindringung im Stahl niedrig sind. Deshalb wird das MIG-Impulslichtbogenschweißen häufig zum Auftragschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen auf Stahlwerkstoffe genutzt (siehe Kap. 3.14).

Das MIG-Verfahren zeichnet sich durch

eine hohe Abschmelzleistung (bis zu 6 kg/h [4], bei Hochleistungsprozessen bis 20 kg/h [7]) aus und wird vorwiegend für Kehlnähte und Dickblech-Schweißungen eingesetzt. Es ist im Vergleich zum WIG-Schweißen jedoch porenanfälliger. Durch den Einsatz entsprechend legierter Schweißzusätze kann die Porenbildung in der Schweißnaht minimiert werden (siehe Kap. 7.1 und Tab. 15). Zur weiteren Verbesserung der Qualität von MIG-Nähten können diese nach dem Schweißen noch hammervergütet werden (siehe auch Kap. 3.15).

Eine weitere Steigerung der Abschmelzleistung kann durch verschiedene Varianten des MIG-Schweißens erzielt werden. Die Zweidraht-Technik wird unterteilt in Doppeldraht- und Tandemschweißen. Bei ersterem wird mit zwei Drähten in einem Kontaktrohr gearbeitet. Bei der zweiten Verfahrensvariante wird ein Doppelbrenner mit zwei Kontaktrohren und zwei getrennten Stromquellen verwendet, wodurch eine bessere Prozessregelung und -kontrolle erreicht wird.

Das MIG-Schweißen wurde außerdem mit Hilfe neuester Prozesssteuerungs- und -regelungstechniken für Anwendungen im Dünnblechbereich unter Verwendung eines Kurzlichtbogens weiterentwickelt. Bei diesem Lichtbogentyp findet der Werkstoffübergang im Kurzschluss statt, wodurch es mit konventioneller Technik zu einem hohen Kurzschlussstrom und starker Spritzerbildung kommt. Es wurde durch die Entwicklung neuer Drahtvor-schubregelungen (Cold-Metall-Transfer-Prozess, CMT [7]) bzw. durch die Entwicklung hochdynamischer Steuerungstechnik (ColdArc, [43]) ein nahezu stromloser Werkstoffübergang ohne Spritzer und mit geringer Wärmeeinbringung erreicht. Sie wird bereits industriell zum Verschweißen von Kupfer-Folien eingesetzt und könnte in Zukunft für die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen an Bedeutung gewinnen.

3.4.4 Wolfram-Plasmaschweißen

Ein Plasma ist ein hoch ionisiertes Gas, das aus Ionen, freien Elektronen, Lichtquanten und Atomen bzw. Molekülen besteht. Die Konzentration der Ladungsträger ist in Etwa gleich, weshalb das Plasma nach außen hin praktisch neutral wirkt. Es besitzt jedoch sowohl eine gute elektrische als auch thermische Leitfähigkeit, so dass im Plasma hohe Temperaturen herrschen [4].

Das Plasmaschweißen (15) ist ein Prozess, bei dem ein von einer Wolfram-Elektrode zum Werkstück brennender Lichtbogen von einer zweiten wassergekühlten Düse (Plasmadüse) durch einen zusätzlichen Gasmantel eingeschnürt wird. Auf Grund dieser Einschnürung werden Lichtbogendivergenzen von etwa 6° erreicht (Vergleich freier Lichtbogen beim WIG-Schweißen: Divergenz etwa 45°) [7]. Für das Plasmaschweißen kommen z. B. Ar, He oder Gemische aus beiden als Schutzgase zum Einsatz. Es kann mit oder ohne Zusatzwerkstoff ausgeführt werden, wobei der Schweißzusatz wie beim WIG-Verfahren getrennt zugeführt wird.

Gegenüber dem WIG-Schweißen hat das Plasma-Verfahren eine Reihe von technischen Vorteilen. Durch die starke Einschnürung des Lichtbogens erreicht dieser eine sehr hohe Energiedichte und ist unempfindlicher gegenüber Abstandsschwankungen. Deshalb ist dieses Schweißverfahren sehr gut vollmechanisier- und automatisierbar. Auf Grund der hohen Temperaturen und dem daraus resultierenden hohen Ionisierungsgrad ist der Lichtbogen sehr stabil, auch bei sehr niedrigen Schweißstromstärken (unter 1 A im Dünnblechbereich) und bei einer durch Abbrand veränderten Elektrodenspitze. Die Schweißparameter haben nur einen geringen Einfluss auf die Lichtbogenform. Außerdem entsteht nur eine geringe Ablenkung des eingeschnürten, richtungsstabilen Plasmalichtbogens durch Kanten (Blaswirkung) [4]. Mit der hohen Energiedichte, dem tiefen Einbrand und der höheren Schweißgeschwindigkeit lassen sich schmalere Schmelzzonen in Kombination mit einer geringeren Wärmeeinbringung sowie weniger Verzug realisieren [4], [7]. Durch die kon-

zentrierte Energieeinbringung wird außerdem eine bessere Entgasung des Schmelzbades erreicht. Nachteilig sind die Notwendigkeit einer exakten Schweißnahtvorbereitung, die hohen Investitionskosten und der im Vergleich zum WIG-Schweißen größere Brenner sowie der notwendige geringere Abstand zum Werkstück, wodurch Probleme mit der Zugänglichkeit entstehen können [7]. Das Wolfram-Plasmaschweißen (WP) wird unterteilt in das Plasmastrahl- (WPS), das Plasmalichtbogen- (WPL) und das Plasmastrahl-Plasmalichtbogenschweißen (WPSL). Beim **WPS-Verfahren** brennt der Lichtbogen zwischen der negativ gepolten Wolfram-Elektrode und der Plasmadüse (nicht übertragener Lichtbogen), beim WPL-Verfahren zwischen der Wolfram -Elektrode und dem Werkstück (übertragener Lichtbogen). Beim **WPSL-Verfahren** wird mit übertragenem und nicht übertragenem Lichtbogen gearbeitet. Das **WP-Verfahren** wird hauptsächlich zum Verbindungsschweißen eingesetzt, ist aber auch zum Auftragschweißen geeignet. Geschweißt wird hauptsächlich in PA-Position, bedingt sind ebenfalls PB und PC möglich [4]. Bei Blechdicken bis ca. 3 mm wird das oberflächennahe Wärmeleitungsschweißen angewendet, bei Wanddicken größer als 3 mm wird mit einer erhöhten Energiedichte der Stichlocheffekt (**WPL-Verfahren**) erzeugt. Bei letzterem Verfahren wird infolge der Wärmeleitung tiefer liegendes Material aufgeschmolzen und im Strahlzentrum verdampft. Dabei bildet sich eine Dampfkapillare, die von einem flüssigen Mantel umgeben ist und ein noch tieferes Eindringen des Plasmastrahls ermöglicht. Durch die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück fließt das an der Strahlvorderseite aufgeschmolzene Material um die Dampfkapillare herum und erstarrt hinter ihr. Bei Kupfer lässt sich die Methode des Stichlocheffekts bei der Blechschweißung im Wanddickenbereich von 3 bis 5 mm gut anwenden. Diese Schweißungen sind nur automatisiert realisierbar [4]. Die Zuführung eines stromlosen Zusatzdrahtes (0,8–1 mm \varnothing) ist ebenfalls möglich [8]. Beim **Mikroplasma-schweißen** wird grundsätzlich wie beim Plasmaschwei-

ßen gearbeitet, allerdings mit geringen Stromstärken ($I = 0,1 \dots 50 \text{ A}$ [4]) und ohne Stichlocheffekt. Für das Verschweißen von dünnwandigen Teilen (0,01 bis 1 mm [4]) wirken sich die Richtungsstabilität des Lichtbogens und die Lichtbogenstabilität günstig aus. Auch im Mikroplasmabereich gibt es interessante Anwendungen für Kupfer, z. B. das Anschweißen von dünnen Kupfer-Drähten ($d = 0,05 \text{ mm } \varnothing$) an Lötflächen von 0,5 mm Dicke und längsnahtgeschweißte dünnwandige Rohre [8]. Eine weitere Verfahrensvariante ist das **Plasma-MIG-Schweißen**. Dabei wird die Wolfram- durch eine ringförmige Kupfer-Elektrode ersetzt. Die MIG-Drahtelektrode wird durch die Kupfer-Anode geführt. Beide sind positiv gepolt. Mit dieser Technik werden vor allem die Abschmelzleistung und die Schweißgeschwindigkeit erhöht [7]. Kupferlegierungen lassen sich bis ca. 6 mm Blechstärke mit diesem Verfahren fügen.

3.5 Widerstandsschweißen

3.5.1 Allgemeines

Beim Widerstandsschweißen (2) wird die zum Fügen erforderliche Wärme durch den elektrischen Widerstand der Schweißzone während des Fließens von Strom erzeugt (Widerstandswärme, Joulesche Wärme). Die Verfahren können mit oder ohne Anwendung von Kraft und mit oder ohne Verwendung eines Schweißzusatzwerkstoffes durchgeführt werden. Meist wird unter Kraftaufbringung und ohne Zusatzwerkstoff gearbeitet. Die Anwendung dieser Verfahren ist einerseits metallurgisch wesentlich besser, einfacher und schneller als das Schmelzschweißen mit der Gasflamme oder dem Lichtbogen, andererseits aber schränkt die teilweise sehr hohe elektrische Leitfähigkeit der Kupfer-Werkstoffe die Größe der verschweißbaren Querschnitte ein. Mit Verfahren dieser Gruppe wird mengenmäßig das meiste Kupfer verschweißt, da Verbindungen metallurgisch hoher Güte kostengünstig erzielt werden können und der Einsatz in der Massenfertigung möglich ist. Das Widerstandsschweißen von Kupfer hat für die Elektrotechnik besondere Bedeutung gewonnen, weil die Sauer-

stoff-Gehalte der dort verwendeten, meist unlegierten Kupfer-Sorten die Widerstandsschweißbarkeit nicht beeinflussen.

Für das Widerstandsschweißen von Kupfer sind die Verfahren Widerstands-Punkt-, -Rollennaht- und Buckel- sowie Pressstumpf- und Abbrennstumpfschweißen von Bedeutung.

3.5.2 Widerstands-Punkt- und -Rollennahtschweißen

Beim Widerstands-Punkt- und -Rollennahtschweißen (21 und 22) wird die Fügestelle zwischen den Werkstücken durch zwei stift- oder rollenförmige Wolfram-Elektroden unter Druck durch Widerstandserwärmung lokal so weit erhitzt, dass sich zwischen den Fügeteilen eine Schweißlinse bildet. Dieser Druck wird während des gesamten Schweißvorgangs aufrecht erhalten, um eine rissfreie Erstarrung der Schweißlinse sicherzustellen. Die Verbindungsausbildung erfolgt bei diesen Verfahren somit im schmelzflüssigen Zustand.

Für diese Schweißverfahren sind besonders die Stoff- und Kontaktwiderstände von Bedeutung. Während die Stoffwiderstände zu Beginn der Schweißung gering und die Kontaktwiderstände, bei Kupfer besonders zwischen Elektrode und Fügeteilen, groß sind, ändert sich dieses Verhältnis schon nach kurzer Zeit. Die Besonderheit beim Schweißen von un- und niedriglegiertem Kupfer liegt in dessen geringem elektrischen Werkstoffwiderstand und den eingesetzten Elektroden aus Wolfram, und Molybdän oder Legierungen auf Basis dieser Werkstoffe. Auf Grund dieser Aspekte befindet sich der größte elektrische Widerstand nicht im Fügespalt, sondern an den Kontaktflächen zwischen Elektrode und Werkstück. Da die Fügezone erst durch Wärmeleitung erhitzt wird, wird vom konduktiven Widerstandsschweißen gesprochen. Der Oberflächenzustand und die Wärmeleitfähigkeit der Bleche und Elektroden beeinflussen das Widerstandsschweißen deshalb stark, da z. B. Oxidschichten den Stromdurchgang stören und zu hohe Wärmeableitungsverluste das Fügen behindern können [4].

Die Besonderheit des Rollennahtschweißens ist das Erzeugen einer linienförmigen Naht durch Aneinanderreihung einzelner Punktschweißungen (siehe Abb. 9). Es gibt drei Möglichkeiten der Stromführung: Zum einen können die Rollenbewegung und der Wechselstrom bei wechselnden Umdrehungszahlen kontinuierlich sein. Das führt jedoch zu erheblichem Verzug bei Blechdicken von mehr als 1 mm. Andere Möglichkeiten bietet das Impulsschweißen bei kontinuierlicher Rollenbewegung oder das Schweißen mit unterbrochenem Stromfluss, wobei die Rollenbewegung stromlos ausgeführt und bei ruhenden Rollen geschweißt wird. Diese beiden Varianten ermöglichen ein Verschweißen auch von dickeren Blechen mit nur geringem Verzug. Generell ist beim Rollennahtschweißen die Nebenschlusswirkung sehr hoch, so dass im Vergleich zum Punktschweißen nur halb so dicke Bleche gefügt werden können [4].

Für diese Verfahren werden keine Schutzgase und selten Zusatzwerkstoffe eingesetzt. Ein Vorwärmen kann unter Umständen von Vorteil sein, da die elektrische und thermische Leitfähigkeit mit zunehmender Temperatur sinkt.

Um die Verbindungsqualität und die Gefügeeigenschaften zu verbessern sowie eine schmale Wärmeeinflusszone

zu erreichen, werden kurze Schweißzeiten im Bereich von Millisekunden bis Sekunden eingestellt. Das Schweißergebnis beeinflussen neben den Werkstoffeigenschaften vor allem die Form und Abmessung der Elektroden. Sie bestimmen die Wärmeleitung, Stromdichte, Widerstände, Schweißpunktgröße, etc. Für gut leitende Werkstoffe werden meist ballige Elektroden verwendet. Damit sie während des Schweißvorganges ihre Form nicht verändern, ist eine gute Kühlung notwendig [4].

Bei Bauteilen aus Kupferwerkstoffen können auf Grund der hohen Leitfähigkeit nur Überlappstöße im Dünnblechbereich gefügt werden. Besonders in der Elektro- und Feinwerktechnik werden häufig Kleinteile aus unterschiedlichen Materialien mit metallischen Überzügen benötigt, die teilweise ebenso gut mit dem Widerstandspunktschweißen verbunden werden können wie unbeschichtete [78].

3.5.3 Buckelschweißen

Beim Buckelschweißen (23) als eine Sonderform des Widerstandspunktschweißens wird der Stromfluss durch die Bauteilform bestimmt. Vor der Schweißung werden durch mechanische Bearbeitung Erhebungen in eins oder beide Füge Teile eingebracht und während des Fügevorgangs wieder eingebnet. Es entstehen oft mehrere

Schweißpunkte gleichzeitig. Bei elektrischen Kontakten werden jedoch auf Grund der nur bedingt möglichen Prozess- und Qualitätskontrolle und der Wichtigkeit jedes einzelnen Kontaktes nur einzelne Schweißstellen erzeugt. Dabei wird neben dem Stromfluss auch der Einsinkweg der Elektrode überwacht. Auf Grund der großen Auflagefläche der meist flach gestalteten Elektroden und der geringen spezifischen Stromdichte ist deren Abnutzung gering. Deshalb ist dieses Verfahren gut für die Massenfertigung geeignet. Das Verfahren kann z. B. zum Fügen von Mischverbindungen wie CuSn8 mit CuZn15 genutzt werden [60], [86]. Für die Verarbeitung von unlegiertem Kupfer ist es dagegen nur bedingt geeignet [80].

Durch das Schweißen mit Kondensatorentladung kann der Prozess noch schneller und wirtschaftlicher ausgeführt werden. [4] Dieser Prozess ist jedoch ohne Regelung, definierte Schweißzeiten sind nicht einstellbar. Aus diesem Grund ist das Verfahren nur für bestimmte Anwendungen und nur eingeschränkt für Kupferwerkstoffe einsetzbar.

3.5.4 Pressstumpfschweißen

Bei diesem Verfahren werden die Fügeflächen der Werkstücke durch das Aufeinanderpressen mit konstantem oder zeitlich veränderlichem Druck bis auf die atomare Ebene angenähert. Die Arbeitstemperaturen beim Pressstumpfschweißen (25) liegen unterhalb des Schmelzpunktes, so dass die Verbindung vorrangig durch Diffusionsprozesse und Verformung hergestellt wird. Es wird ohne Schutzgase, Zusatzwerkstoffe, Flussmittel und Vorwärmen gearbeitet.

Beim vollmechanisierten oder automatisierten Pressstumpfschweißen werden die Fügeflächen als planparalleler Stumpfstoß ausgeführt. Sie müssen in Form und Maß übereinstimmen. Oxide und Verunreinigungen sind von den Fügeflächen zur Gewährleistung einer guten Schweißnahtqualität und zur Vermeidung von Bindefehlern zu entfernen. Dies geschieht durch chemische oder mechanische Oberflächenreinigung vor dem Schweißen. Durch die Anwendung von zeitlich veränderlichem Druck finden Rekristalli-



Abbildung 9: Mit dem Rollennahtschweißen gefertigter Meisterstützen zur Dachentwässerung aus 0,6 mm dickem Cu-DHP [64]

sationsvorgänge statt, wodurch ein feinkörnigeres, festeres Gefüge als bei zeitlich konstantem Druck entsteht. Auf Grund der sehr guten elektrischen Leitfähigkeit von Kupfer sind die Übergangswiderstände auch zwischen den Fügepartnern gering, so dass hohe Stromstärken zum Erhitzen notwendig sind. Dieser Vorgang ist vergleichsweise lang, wodurch breite Wärmeeinflusszonen entstehen und die Fügeverbindungen nur geringe dynamische Festigkeitswerte aufweisen. Ein weiterer Nachteil des Verfahrens sind die entstehenden Wulste an den Verbindungsstellen. Sie müssen nach dem Fügen abgearbeitet werden. Wegen der genannten Nachteile ist der Einsatz dieses Verfahrens für den Werkstoff Kupfer nur auf Sonderfälle begrenzt. Vorrangige Anwendung ist das Verlängern von Drähten. Die Größe des maximal möglichen Querschnitts ist bei Kupfer wegen der guten elektrischen Leitfähigkeit und der Oxidationsneigung auf ca. 50 mm² [6] begrenzt. [4], [7]

3.5.5 Abbrennstumpfschweißen

Das Abbrennstumpfschweißen (24) ist eine Abwandlung des Pressstumpfschweißens, mit dem größere Querschnitte verschweißbar sind. Die Verbindung wird bei diesem Verfahren durch lokales Kontaktieren der Fügeflächen erreicht. Die jeweils zur Berührung kommenden Unebenheiten werden auf Grund der hohen Stromdichte sehr schnell verflüssigt und verdampft. Es kommt zum Abbrennen der Stoßenden durch Ausschleudern von flüssigem Werkstoff [4]. Die Fügeflächen werden abhängig vom Materialverlust langsam aufeinander zu bewegt und nach einer definierten Zeit bzw. Abbrennlänge schlagartig gegeneinander gestaucht und somit verbunden. Der notwendige Stauchdruck liegt zwischen 400 und 1000 N/mm². Es bildet sich ein schmaler, scharfer Stauchgrat, der noch im warmen Zustand entfernt wird. Durch den hohen Druck des verdampfenden Materials von 50 bis 150 MPa kann ohne Schutzgas gearbeitet werden (Ausnahme: Rohrverbindungen) [7]. Bei diesem Verfahren werden weder Zusatzwerkstoffe noch Flussmittel eingesetzt. Vorwärmen ist nicht notwendig, ermöglicht

jedoch das Verschweißen von größeren Querschnitten [7].

Das Abbrennstumpfschweißen kann sowohl vollmechanisiert als auch automatisiert eingesetzt werden. Konstruktive Voraussetzung dieses Verfahrens sind planparallele Stoßflächen. Eine Vorreinigung der Oberflächen ist nicht notwendig, da während des Schweißprozesses Verunreinigungen, Oxide, Schlacke und ähnliches verbrannt, ausgeschleudert oder aus der Schweißfuge in den Stauchgrat gedrückt werden. Die entstehenden Verbindungen sind von hoher Qualität mit geringen Schweißspannungen und besitzen eine schmale Wärmeeinflusszone, so dass die Schweißnaht weder metallurgisch noch maßlich auffindbar ist. Nachteile des Verfahrens sind das Spritzen flüssigen Metalls, der hohe technische Aufwand der Anlagen und die notwendige sehr hohe Schweißenergie des Transformators.

Das Abbrennstumpfschweißen wird zum Schweißen von Stumpfstößen an Profilen genutzt und ist bei Werkstücken gleicher Abmessungen sowie größeren Stückzahlen wirtschaftlich. Mit dem Verfahren werden Stromschienen und Walzdraht aus Kupfer mit Querschnitten von ca. 60 bis 500 mm² verschweißt. Die maximal fügbare Querschnittsfläche dieses Verfahrens beträgt ca. 1500 mm². Es können auch großformatige Bleche bzw. Bänder mit Breiten bis 820 mm und Dicken bis 5,5 mm aus CuSn-, CuZn- und CuNiZn-Legierungen sowie einige niedriglegierte Kupfer-Sorten gefügt werden. Jedoch müssen beim Schweißen dieser Kupfer-Bänder hohe Stauchwege bis zu einem Fünffachen der Blechdicke realisiert werden, weshalb eine hohe Gefahr des Einknickens besteht. Aus diesem Grund sind Bänder aus weichen Kupfer-Sorten nicht für das Abbrennstumpfschweißen geeignet. Neben artgleichen Verbindungen können auch Werkstoffkombinationen, z. B. Cu und Al, verschweißt werden [7].

3.5.6 Widerstandspressschweißen mit Hochfrequenz

Wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit des Kupfers wird die Erwärmung der Stoßflächen in besonderen Fällen mit hochfrequentem Wechselstrom durchgeführt (291), weil dieser mit steigen-

der Frequenz immer mehr auf die Oberfläche des leitenden Werkstoffes begrenzt bleibt. Die wirksame Schweißwärme wird deshalb mit steigender Frequenz günstiger verteilt und durch die Hochfrequenz mit weniger elektrischer Leistung erreicht. Eine besondere Wirkung wurde mit der so genannten Radiofrequenz (300 bis 500 kHz) erzielt, wobei die zugeführte Energie auf den Fügeflächen eine hauchdünne flüssige Schicht erzeugt, weshalb sich das Verfahren für die kontinuierliche Fertigung geschweißter dünnwandiger Rohre und Profile eignet. Kupfer-Rohre mit einem Durchmesser von 12,5 mm und 0,127 mm Wanddicke können z. B. mit einer Geschwindigkeit von 92 m/min geschweißt werden.

3.5.7 Impulsstrom-Schweißen (Ultrapuls- oder Kurzzeitschweißen)

Die erforderliche Schweißtemperatur wird mit Hilfe eines Stromimpulses von 1500 bis 3500 A und kurzer Dauer (3 bis 6 ms) bewirkt, der meist aus einer Kondensatorentladung stammt. Das Schmelzen der Oberfläche wird in 1 bis 3 ms erreicht. In etwa demselben Zeitraum sinkt die Temperatur der Schweißstelle auf den Ausgangswert. Dieses Verfahren ist für den Mikroaparatbau und in der Elektronik von Bedeutung. Es kann für Aufgaben, die eine exakte Wärmeleitung erfordern, eingesetzt werden. Dieses Widerstandspressschweißverfahren wird vorrangig für das Fügen von Klein- und Kleinst-Teilen eingesetzt.

3.6 Ultraschallschweißen

Die Werkstücke werden zwischen Sonotrode und Amboss gelegt und mit Druck beaufschlagt. Durch die hochfrequenten Schwingungen der Sonotrode wird das obere Blech in Schwingung versetzt und erzeugt durch Reibung mit dem Fügepartner Wärme. Die statisch einwirkende Druckkraft nähert durch mikroskopisch kleine Verformungen die Atome beider Werkstückoberflächen auf Gitterabstand aneinander an. Durch diese beiden Effekte entsteht eine Verbindung im festen Zustand. Das Entfernen von eventuell vorhandenen Fett- und Schmierstoffresten vor dem Schweißen ist für eine haltbare Verbindung Voraussetzung, um die notwendige Reibung

zwischen den Füge­teilen und eine mechanische Bindung zu gewährleisten. Die Schweißzeiten für diesen Prozess liegen im Bereich von 0,001 bis 3 s und die Anpresskraft beträgt zwischen 0,01 und 5000 N. Es wird je nach Maschinenleistung mit Frequenzen im Bereich von 20 bis 25 kHz (0,5 ... 8,0 kW), 36 bis 44 kHz (0,02 ... 0,5 kW) oder 56 bis 75 kHz (0,001 ... 0,02 kW) gearbeitet. Diese Leistung bestimmt auch die maximal zu verschweißende Blechdicke des an der Sonotrode anliegenden Bauteils. Es kann auf einer Unterlage fast beliebiger Dicke aufgeschweißt werden. [4], [71] Da die Verbindung im festen Zustand erzeugt wird, sind die Werkstoffveränderungen im Schweißübergang vernachlässigbar gering. Praktisch sind alle Werkstoffpaarungen möglich, wenn sie eine ausreichende metallische Festigkeit aufweisen. Unter den erprobten Werkstoffkombinationen sind lediglich Cu und Sn bzw. CuNi und Sn nicht ultraschallschweißgeeignet. Selbst Verbindungen von Kupfer mit Glas [4] oder Keramik mit einer Zwischenschicht [70], [75] konnten gefügt werden. Das Ultraschallschweißen (41) wird in der Kondensatorenfertigung, im Motor- und Transformatorenbau angewandt sowie zur Herstellung von Kabelbäumen eingesetzt. Ein anderes, großes Anwendungsgebiet ist die optische und feinmechanische Industrie [4]. Zum Verbinden von lackisolierten Kupfer-Drähten [58] bzw. metallisch beschichteten Drähten mit Blechen [72] ohne vorheriges Abisolieren ist dieses Verfahren ebenfalls geeignet. Durch Resonanzerscheinungen beim Ultraschallschweißen können jedoch Beschädigungen an den Bauteilen hervorgerufen werden, weshalb das Verfahren in der Elektrotechnik bzw. Elektronik nur mit entsprechender Vorsicht eingesetzt werden sollte. In diesem Bereich wird hauptsächlich das Drahtbonden, eine Verfahrensvariante des Ultraschallschweißens, das statt einer Sonotrode einen Bondkeil nutzt, zum internen Kontaktieren von Halbleiterbauelementen und Hybridschaltungen eingesetzt.

3.7 Reibschweißen

Die zum Schweißen notwendige Energie wird durch die Rotation eines oder zweier Fügepartner unter Anwendung

einer Axialkraft erzeugt. Die entstehende Reibungswärme führt zu lokaler Erweichung der Bauteile. Nach Erreichen einer bestimmten werkstoffabhängigen Temperatur wird der zum Verbinden erforderliche Stauchdruck aufgebracht und die Schweißverbindung unter Wulstbildung hergestellt. Örtliches Auftreten von Schmelzfluss ist möglich, zur Herstellung einer optimalen Verbindung aber nicht erforderlich. Es wird ohne Schutzgas und Zusatzwerkstoff gearbeitet.

Das Reibschweißen (42) gehört zu den voll mechanisierten und automatisierbaren Pressschweißverfahren und fügt Stumpfstöße hauptsächlich an rotationssymmetrischen Teilen für die Massenfertigung. Durch neuere Entwicklungen in der Anlagentechnik können auch Rechteck- und Vielkantquerschnitte mit hoher Genauigkeit unter Schutzgas gefügt werden [7]. Das Reibschweißen ermöglicht auch das gleichzeitige Fügen zweier Schweißstöße. Es können Rundstäbe mit Durchmessern zwischen 3,5 und 100 mm und Rohre bis maximal 250 mm Außendurchmesser [4] sowie artfremde Werkstoffkombinationen [11] gefügt werden. Da die Verbindung zumindest teilweise aus der festen Phase heraus entsteht, müssen die Fügeflächen vor dem Schweißen von Verunreinigungen und Fremdstoffen, z. B. Zunder, Schmiermittel und Beschichtungen, befreit werden. Die Festigkeitswerte der geschweißten Bauteile liegen bei optimalen Fertigungsparametern immer über den Werten des weicheren Werkstoffs, da auf Grund der ständig ablaufenden Rekristallisation ein sehr feinkörniges Gefüge entsteht. Dies ist aber auch Grund dafür, weshalb bei gehärteten Werkstoffen Entfestigungen auftreten können. Mit diesem Verfahren können neben Cu-Al- [87], [91] auch Cu-Stahl-Verbindungen erzeugt werden [88].

3.8 Rührreibschweißen

Das Rührreibschweißen (43) ist ein Verfahren, bei dem die Prozesswärme und der notwendige Druck von einem externen Werkzeug durch Rotation erzeugt werden. Das Werkzeug besteht aus einem rotierenden Zapfen, an dem ein Stift zentrisch befestigt ist. Er ist im Allgemeinen kürzer als die zu verschweißende Blechdicke und wird

rotierend in die Stoßflächen der Werkstücke gedrückt. Diese müssen gut gegeneinander und auf einer Unterlage befestigt sein, um die entstehenden Kräfte aufzunehmen und ein Verutschen zu verhindern. Wie beim Reibschweißen wird der Werkstoff auf Grund der entstehenden Reibungswärme plastifiziert und dann vom Werkzeug nach oben und außen transportiert. Durch die Unterlage und die Stirnfläche des Zapfens bleibt das feste Schweißgut im Stoß eingeschlossen und bildet die Schweißnaht. [4], [7] (siehe Abb. 10)

Mit diesem automatisierten Verfahren sind sowohl linien- als auch punktförmige Verbindungen im Stumpf- und Überlappstoß möglich [4]. Es werden gute Festigkeits- und Zähigkeitswerte erreicht, da die für das Reibschweißen charakteristischen feinkörnigen Rekristallisationsgefüge entstehen. Poren- und Heißrissbildung, Gasaufnahme, Verzug und andere Probleme, die beim Fügen im schmelzflüssigen Zustand auftreten, werden vermieden. Nachteilig sind die hohen Anlagenkosten, die aufwändigen Spannvorrichtungen und die begrenzte Auswahl an Werkzeugmaterialien ausreichender Festigkeit und Härte für das Verschweißen von Kupferwerkstoffen. Deshalb ist das Verfahren nur für Sondereinsätze und hohe Stückzahlen wirtschaftlich. Angewendet wird es beispielsweise für das Verschweißen von Kupfer-Kanistern mit 50 mm Wandstärke, in denen abgebrannte Brennelemente gelagert werden sollen [57], [67], [69] und für Mischverbindungen z. B. mit Al [84], [89].

3.9 Sprengschweißen

Das Sprengschweißen (44) ist ein Plattierverfahren, mit dem überwiegend blechförmige, großformatige Werkstücke flächig miteinander ver-

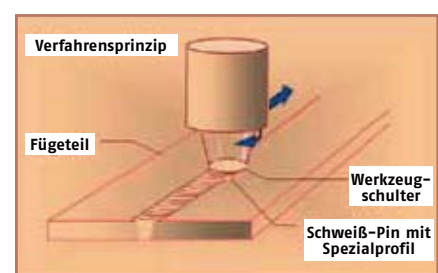


Abbildung 10: Rührreibschweißen

bunden werden können. Dazu wird auf ein Auflageblech, welches über dem Grundblech in gleichmäßigem Abstand angeordnet ist, Sprengstoff deponiert. Durch die Zündung der Sprengladung wird das Auflageblech mit hoher Geschwindigkeit (≥ 500 m/s [44]) auf das Grundblech „aufgerieben“. Die Oberflächen der beiden Werkstoffe nähern sich durch plastische Verformung bis auf den atomaren Gitterabstand aneinander an, so dass die Bindungskräfte der metallischen Bindung wirksam werden. Es kommt dabei nicht zu einem nennenswerten Legierungsaustausch im Sinne einer Diffusion. Die Fügezone ist durch eine wellenförmige Struktur gekennzeichnet, aus der die hohe Verbindungsfestigkeit folgt. Sie hat eine durchschnittliche Breite von 300 μm . In Abhängigkeit vom Material lassen sich Plattierungen standardmäßig mit 2 bis 15 mm Dicke ausführen. Darüber hinaus lassen sich Materialien teilweise mit Dicken von bis zu 25 mm plattieren. Das Grundblech kann beliebig dick sein. Voraussetzung für den Plattierprozess sind metallisch blanke Oberflächen. Neu gebildete Oxide werden im Prozess durch den plasmaartigen Zustand unmittelbar vor der Fügezone beseitigt [4]. Die entstandenen Verbindungen besitzen auf Grund der prozessbedingten Verformung in der Fügezone meist höhere Scherfestigkeiten, verglichen mit den Streckgrenzen der beteiligten Werkstoffe. Schwierigkeiten treten nur bei spröden bzw. schockempfindlichen Werkstoffen auf, die die einwirkende Schockbelastung nicht aushalten. Dazu zählen z. B. bestimmte Gussbronzen. [44] Der große Vorteil des Sprengschweißens besteht in der möglichen Kombination verschiedener Werkstoffe, die mit anderen Verfahren nicht oder nur mit großem Aufwand gefügt werden können. Damit können Bauteile funktionsgerecht und wirtschaftlich gestaltet werden. Der Trägerwerkstoff liefert z. B. die Festigkeit, während der Plattierungswerkstoff den Korrosionsschutz übernimmt. Bei kritischen Beanspruchungen, wie z. B. hohen Temperatur-, Druck-, Vakuum- sowie Druckwechsel- und Temperaturwechselbeanspruchungen, weisen kupferplattierte Verbundwerkstoffe im Vergleich z. B. zu Massiv-

Kupfer beachtliche technische und wirtschaftliche Vorteile auf. Das Sprengschweißen von Kupferwerkstoffen wird großtechnisch durchgeführt, beispielsweise zur Herstellung von Elektrodenträgern für Stahl-Schmelzöfen (Cu auf Stahl oder Al), die keine eigene Stromzuführungen (Kupfer-Kabel) mehr benötigen. Die verwendeten Verbundwerkstoffe bestehen aus Stahlblechen mit 15 bis 30 mm Wanddicke, plattiert mit einer Kupfer-Auflage von 5 bis 20 mm Dicke [16], [44]. Weitere, häufig eingesetzte Werkstoffkombinationen sind Stahl mit CuNi30Fe und Cu mit Al, Ni, Ti [68] oder Ta [44].

3.10 Diffusionsschweißen

Beim Diffusionsschweißen (45) werden entweder nur die Fügeflächen oder die gesamten Bauteile erwärmt und, unter statischer Druckeinwirkung und geringer Verformung, durch Diffusion der Atome über die Stoßflächen hinweg miteinander verbunden. Zur Vermeidung von Oxidation wird in Schutzgasatmosphäre oder unter Vakuum gearbeitet. Es werden auf Maß gearbeitete Einzelteile, die aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehen können, verschweißt. Die Parameter Zeit, Druck und Temperatur bedingen einander, so dass bei erhöhter Temperatur die Schweißzeit verkürzt bzw. der Druck gesenkt werden kann. Abhängig vom Werkstoff beträgt die Schweißzeit zwischen einigen Minuten und mehreren Stunden, weshalb das Diffusionsschweißen hauptsächlich für mit anderen Fügeverfahren schwer schweißbare Werkstoffkombinationen eingesetzt wird. Vorteile dieses Verfahrens sind die Möglichkeit, fertig bearbeitete Bauteile zu verschweißen und die nahezu unbegrenzte Größe der Fügefläche (Querschnitte von 1 bis $5 \cdot 105$ mm²), die nur durch die Art und Weise der Druckaufbringung und die Wärmeeinbringung (gleichmäßige Durchwärmung der Bauteile) eingeschränkt wird.

Neben den zum Teil sehr langen Schweißzeiten und dem aufwändigen Equipment sind die hohen Anforderungen an die Fugenvorbereitung (Sauberkeit und Genauigkeit, geringe Rauheit) Nachteile des Verfahrens.

Eingesetzt wird es z. B. in der Energie- und Hochvakuumtechnik, im Flugzeug- und Raketebau sowie in der Kerntechnik. Beispiel für Werkstoffpaarungen ist das Verschweißen von Metall mit Keramik. Kupfer lässt sich mit diesem Verfahren z. B. mit Stahl, Al₂O₃-, SiC- und ZrO₂-Keramik gut verschweißen [4], [74], [90].

3.11 Kaltpressschweißen

Das Verfahren (48) verbindet begrenzte Oberflächenbereiche unterhalb der Rekristallisationstemperatur unter hohem Druck durch plastische Verformung. Dabei werden die Fügeflächen überlappend zwischen keilförmigen Druckstempeln oder stumpf mit beschränktem Durchmesser in engen Kontakt gebracht [9], so dass die Kohäsionskräfte beider Oberflächen eine Bindung bewirken. Da die Verbindung im festen Zustand gebildet wird, können praktisch alle metallischen Werkstoffe mit einer ausreichenden Duktilität (Umformgrad bis zu 300 %) miteinander verbunden werden [90]. Für harte bzw. gehärtete Werkstoffe ist dieses Verfahren nicht einsetzbar.

Bedingung für eine stabile Verbindung sind saubere, fett- und oxidfreie Fügeflächen, eine ausreichende Kaltverformbarkeit mindestens einer Komponente, da erst nach einem bestimmten Umformgrad eine Verbindung entsteht, und eine geeignete Festigkeit der Werkstoffe. Metalle mit kfz-Gitterstruktur, z. B. Cu, sind deshalb für das Kaltpressschweißen bestens geeignet.

Beim Schweißen von Überlappstößen entsteht immer eine Querschnittsverminderung (für Cu 85 %), bei Stumpfstoßen dagegen eine Oberflächenvergrößerung (für Cu 250 %) [4]. Das Verfahren findet heute Anwendung für elektrische Leitersysteme [10], zum Verschweißen von Fahrdrähten elektrischer Kupfer-Bahnen, zur Herstellung von Bimetallkontakten und Drahtverbindungen aus Cu und Al [4] sowie in der Verpackungsindustrie.

3.12 Strahlschweißverfahren

3.12.1 Allgemeines

Die beiden wichtigsten Strahlschweißverfahren (5) sind das Elektronen- und das Laserstrahlschweißen. In Tab. 3 sind die gemeinsamen Vor- und Nachteile beider Verfahren aufgeführt.

Hervorzuheben ist, dass das Elektronen- und das Laserstrahlschweißen nicht miteinander konkurrieren, da sich die Anwendungsbereiche prinzipbedingt unterscheiden. Beide Verfahren besitzen für spezielle Anwendungen in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen ihre Bedeutung.

In Abb. 11 ist der Vergleich des Wirkungsgrades beider Schweißverfahren zu sehen.

Eine Gegenüberstellung der prinzipbedingten Vor- und Nachteile zeigt Tab. 4.

	Vorteile	Nachteile
Prozess	Hohe Leistungsdichte	Hohe Prozesskosten
	Kleiner Strahldurchmesser	hohe Anforderungen an Reinheit der Bauteile
	Hohe Schweißgeschwindigkeit	-
	Berührungsloses Werkzeug	-
	Schweißen unter Atmosphäre möglich	-
	Wärmeleitungs- und Tiefschweißen	-
Werkstück	Minimale thermische Belastung	Aufwändige Nahtvorbereitung
	Geringer Verzug	Exakte Positionierung
	Schweißen fertig bearbeiteter Teile	Aufhärtungsgefahr
	Schweißen an schwer zugänglichen Stellen	Rissgefahr
	Schweißen von Werkstoffkombinationen	Schweißen von Werkstoffen mit hohem Anteil niedrig schmelzender Phasen oder gelöster Gase sowie beschichteter Bauteile schwierig
Anlage	Kurze Taktzeiten	Schutz vor entstehender Strahlung notwendig
	Mehrstationenbetrieb möglich	Hohe Investitionskosten
	Anlagenverfügbarkeit > 90 %	-
	Gute Automatisierbarkeit	-

Abbildung 3: Gemeinsame Vor- und Nachteile der Strahlschweißverfahren, nach [7], [12]

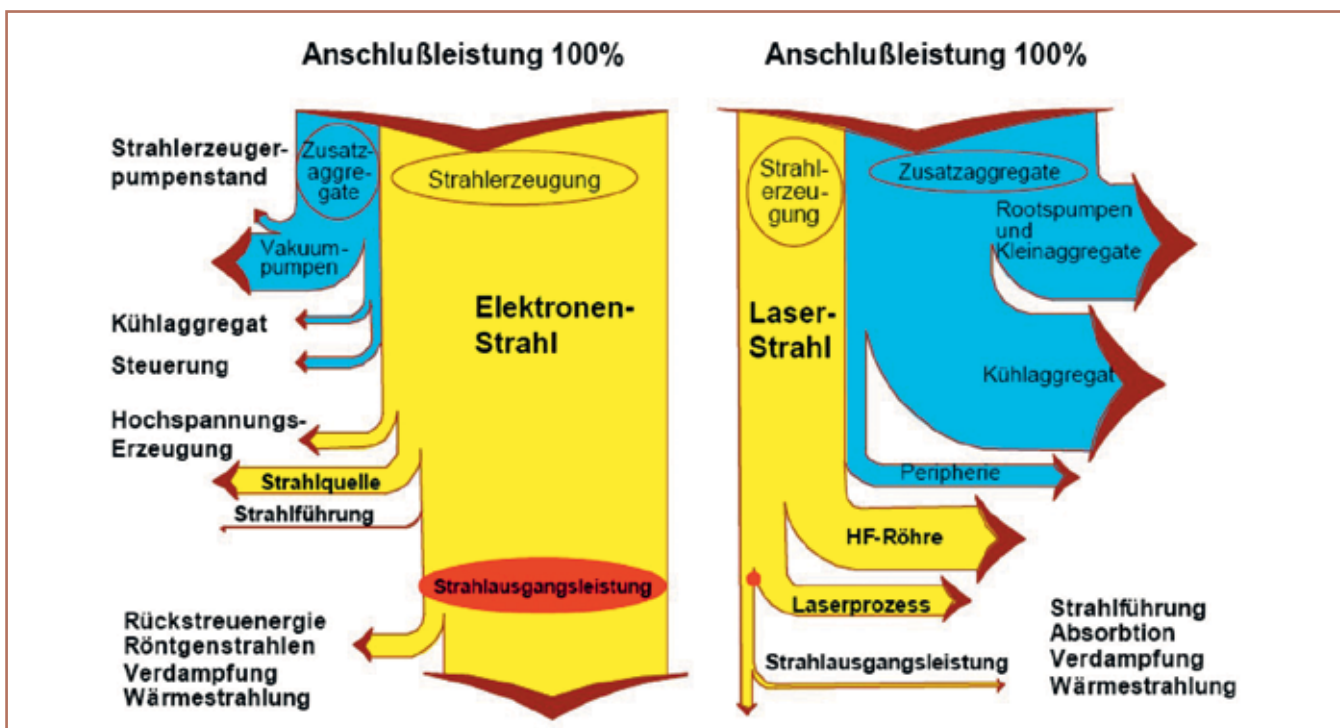


Abbildung 11: Vergleich des Wirkungsgrades von Elektronen- und Laserstrahl (CO₂ Laser) (ISF Aachen)

Kriterium	Elektronenstrahlschweißen	Laserstrahlschweißen
Wärmeeinbringung	<< (abhängig von Beschleunigungsspannung)	< (abhängig von Leistung, Wellenlänge/ Absorption/ Reflexion Werkstoff)
Breite Naht	<<	<
Verhältnis Tiefe/Breite	bis zu 50	in Abhängigkeit der Leitfähigkeit, maximal bis zu 25
Verzug	<<	<
Kosten Schutzgas	0 (Vakuum → Stromkosten)	>
Energieverbrauch	niedrig	hoch
Wirkungsgrad (siehe Abbildung 11)	hoch (90 ... 95 %) [51]	gering (Nd: YAG < 5 %, Faserlaser maximal 30 %) [41]
Materialien	nur Metalle (Kriterium: elektrische Leitfähigkeit)	alle (Al und Cu schwer schweißbar)
Anwendung	Dickblechbereich (Reines Cu: max. 95 mm; CuNi10 max. 120 mm) [52]	Dünnblechbereich (Faserlaser bis 4 mm) [41]
Reflexionsneigung von Metallen	kein Einfluss	hoch
Strahlableitung durch Magnetismus	möglich	nicht möglich
Strahlführung und- formung	einfach	Festkörper- und Faserlaser: einfach (über Fasern); Glasfaser: aufwendig, Spezialoptiken
Leistungsverluste an optischen Elementen	nein	ja
Schutz vor Strahlung	notwendig (Röntgenstrahlung)	notwendig
Entstehung von gefährlichen Dämpfen außer Metaldämpfe	Ja (Ozon)	ja (Ozon)

<< sehr niedrig

< niedrig

> hoch

>> sehr hoch

Tabelle 4: Vergleich Elektronen- und Laserstrahlschweißen, Eigenschaften, nach [7], [45]

3.12.2 Elektronenstrahlschweißen

Bei diesem Verfahren [51] werden Elektronen aus einer Kathode gelöst, mit Hilfe von elektrischen Feldern zu einem Strahl geformt und in Richtung der Anode beschleunigt. Dabei erreichen sie Geschwindigkeiten von bis zu zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit. Beim Eindringen in den Grundwerkstoff werden sie abgebremst, so dass ihre kinetische Energie fast vollständig in Wärme umgewandelt wird. Ab einer Leistungsdichte von über $0,5 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$ entsteht der sogenannte Tief-schweißeffekt [53].

Die Beschleunigungsspannung der Elektronen beträgt etwa 30 bis 150 kV und die typischen Strahldurchmesser liegen zwischen 0,1 und 1 mm. Damit können Leistungsdichten zwischen 10^6 und 10^9 W/cm^2 erzielt werden.

Bei Cu-Werkstoffen sind bereits Prozessgeschwindigkeiten bis zu 120 mm/s (bei 3 mm dickem Blech) realisiert worden. Das Schweißen der Werkstücke wird vorrangig durch die Ablenkung des Elektronenstrahls erreicht. Bei sehr großen Bauteilabmaßen ist eine Kombination aus der Bewegung von Werkstück und Strahl

möglich. [12], [53], [54], [55]

Bei den Strahlschweißverfahren müssen die Nahtflanken immer vorgereinigt werden, da Verunreinigungen explosionsartig verdampfen und zu Poren und Einschlüssen führen können. Legierungen mit einem hohen Anteil an niedrig schmelzenden Phasen, vor allem Zn, sind mit diesem Prozess nur bedingt schweißbar. Die Verdampfung der niedrig schmelzenden Bestandteile führt zur Porenbildung in der Schweißnaht. Die Verdampfung von niedrig schmelzenden Elementen ist auch beim Schweißen von oberflächenbeschichteten Bauteilen zu beachten. Wird jedoch ein Bereich von 0,2 mm neben der Fügefläche nicht beschichtet, sind Nähte hoher Qualität herstellbar [55]. Auch ein hoher Gasgehalt (O und/oder H) beeinträchtigt die Schweißbarkeit einiger Kupfer-Sorten mit dem Elektronenstrahl [55].

Für das Elektronenstrahlschweißen werden keine Schutzgase benötigt, da es prinzipbedingt im Vakuum erfolgt. Es wurde jedoch auch eine Verfahrensvariante entwickelt, bei der der Strahl über mehrere Druckstufen hinweg

unter Luftatmosphäre arbeitet. Dafür wird zusätzlich He als Schutzgas eingesetzt. Der Einsatz eines Zusatzwerkstoffes ist möglich, meist wird aber ohne geschweißt. Vorwärmen ist im Allgemeinen nicht notwendig, kann aber gleichzeitig zum Schweißen zur Verringerung von Spannungen im Bauteil durchgeführt werden. [54], [55] Wichtige Vorteile des Verfahrens sind die hohe Energiedichte und die somit geringe Wärmeeinbringung, die eine sehr schlanke Schweißnaht und einen geringen Verzug bedingen. Außerdem ist der Strahl sehr exakt und schnell lenkbar auf Grund seiner geringen Masse. Die Herstellung einer Naht ist im Gegensatz zu vielen anderen Schweißverfahren fast unabhängig von der Materialdicke und erfolgt meist in einem Durchgang. Je größer das Bauteil und die Einschweißtiefe deshalb ist, desto wirtschaftlicher ist das Schweißen mit dem Elektronenstrahl im Vergleich zu anderen Schmelzschweißverfahren. [54], [55] Nachteilig ist der sogenannte Thermocouple-Effekt, der durch magnetisierte Bauteile oder Vorrichtungen auftreten und den Strahl von der eigentlichen

Fügestelle ablenken kann [55]. Durch die Entwicklung von neuen Anlagentypen, wie z. B. Schleusenanlagen, die bis zu vier Mal produktiver sind als Kammeranlagen, konnten die hohen Nebenzeiten zur Vakuumerzeugung (Bearbeitung von Cu im Feinvakuum, ab ca. 10^{-2} mbar) kompensiert bzw. reduziert werden [45]. Trotzdem müssen Energie und Zeit für die Erzeugung des Vakuums berücksichtigt werden.

Bei Atmosphärenanlagen befindet sich nur der Elektronenstrahlerzeuger im Vakuum. Der Strahl wird über Druckstufen an die Atmosphäre und zum Werkstück gebracht. Da die Elektronen sehr leicht sind, werden sie nach Kollision mit Luftpartikeln stark gestreut. Dies bewirkt eine starke Verbreiterung des Strahls, so dass Werkstücke in einem Abstand zwischen 10 und 20 mm von der Austrittsdüse bearbeitet werden müssen. Durch den Einsatz von He als Schutzgas wird die Reichweite des Strahls erhöht. Zur Aufrechterhaltung dieses „weichen“ Strahls sind hohe Beschleunigungsspannungen (150 ... 200 kV) notwendig, die jedoch auch große Schweißgeschwindigkeiten möglich machen. [12], [54] In [62] konnte nachgewiesen werden, dass Kupferwerkstoffe auch mit dieser Technik im Dünnschichtbereich bis 4 mm schweißbar sind.

Das Elektronenstrahlschweißen ist prädestiniert für die Bearbeitung von reinem Kupfer, da bei diesem Werkstoff auf Grund der hohen Wärmeleitfähig-

keit eine schnelle und hohe lokale Energieeinbringung erforderlich ist. Auch die hohe Schweißgeschwindigkeit wirkt der Wärmeableitung entgegen. Beim Schweißen mit dem Elektronenstrahl entstehen sehr schmale und tiefe Nähte. Zur Erzeugung breiterer Nähte kann der Strahl defokussiert oder oszillierend eingestellt werden. Auch das Nebeneinanderlegen mehrerer Schweißnähte oder das gleichzeitige Schweißen mehrerer Ebenen ist möglich und wurde bereits erfolgreich eingesetzt. Auf Grund der geringen Strahlaufweitung von etwa $0,6^\circ$ ist das Schweißen in engen Spalten durchführbar. [55]

Der Strahl kann mit hoher Geschwindigkeit zwischen mehreren Schweißstellen bewegt werden, so dass die Dampfkapillaren erhalten bleiben, jedoch keine Schmelzspur erzeugt wird. Durch das symmetrische Schweißen an mehreren Stellen, die so genannte Mehrstrahltechnik, entsteht nur ein geringer Bauteilverzug. [54] Mit dem Mehrstrahlschweißen können mittlere Geschwindigkeiten und Einschweiß-tiefen eingestellt werden. Es lassen sich auch nicht parallele Schweißnähte gleichzeitig realisieren, weshalb dieser Prozess häufig zur Produktivitätssteigerung verwendet wird. Des Weiteren ist es möglich, Bauteile an bestimmten Stellen neben der Schweißnaht zu erwärmen und so Druckspannungen einzubringen beziehungsweise das Werkstück vor- oder nachzuwärmen. [54]

Eine weitere Verfahrensvariante ist das

Mehrfokusschweißen (siehe Abb. 12). Es ist ein Mehrstrahlschweißen mit veränderlicher Brennweite, so dass der Strahl beim Springen zwischen zwei festgelegten Brennweiten gleichzeitig eine tiefe Naht mit dem Fokus im Werkstück sowie an der Oberfläche eine Glättungsnaht herstellen kann. Mit einer kontinuierlichen Oszillation wird eine bessere Nahtausbildung erreicht. Mit einer Kombination aus Mehrstrahl- und Mehrfokustechnik ist ein gleichzeitiges Vorwärmen, Schweißen und Glätten möglich. [54]

Das Elektronenstrahlschweißen ist ein häufig angewandtes Schmelzschweißverfahren zum Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen (siehe Abb. 13). Es ist sowohl das Fügen feinsten Folien als auch das Fertigen von Tiefenschweißungen möglich. Auf der einen Seite sind mikromechanische Bauteile ebenso wie Rumpfsegmente von U-Booten und Flugzeugen schweißbar. Dieses Verfahren kann bei Einzelteilen für die Luft- und Raumfahrt genauso angewendet werden wie für die Massenfertigung im Elektronikbereich und im Automobilbau. [54]

Das Schweißen von Kleinteilen wird heute nur noch in Ausnahmefällen durchgeführt, z. B. bei Bauteilen, bei denen die besonderen Eigenschaften des Elektronenstrahls gefordert sind. Die Gasgeneratoren von Airbags gehören dazu und werden auf Grund der Explosionsgefahr elektronenstrahlgeschweißt. Auch bei Werkstücken, bei denen die Strahlpositionierung durch die Rückstreuелеktronen erreicht wer-

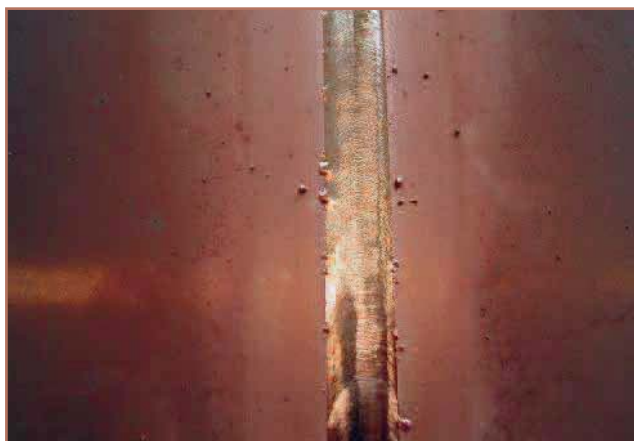


Abbildung 12: Elektronenstrahlgeschweißtes Kupferblech mit Mehrfokustechnik [65]



Abbildung 13: Elektronenstrahlgeschweißte Bronzebuchse aus CuSn12Pb mit 68 mm Einschweißtiefe [56]

den kann und damit automatisierbares Schweißen großer Lose möglich ist, wird der Elektronenstrahl angewendet. [55]

3.12.3 Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen (52) ist ein Schmelzschweißverfahren, bei dem mit inerten Schutzgasen und ohne Zusatzwerkstoff meist Stumpf- und Überlappstöße an dünnen Kupfer-Blechen ausgeführt werden. Die Eigenschaften eines Lasers werden hauptsächlich von drei Komponenten bestimmt: dem laseraktiven Medium, dem Resonator und der Pumpquelle. Die Wellenlänge des Systems wird durch das verwendete Medium festgelegt, die Strahlqualität von den anderen Komponenten beeinflusst. Unterscheidungskriterien sind deshalb:

- Das laseraktive Medium (z. B. CO₂, Nd:YAG),
- Der Aggregatzustand des laseraktiven Mediums (gasförmig, flüssig, fest),
- Art der Anregung (elektrisch oder optisch),
- Geometrie des laseraktiven Materials (Stab-, Slab-, Scheiben-, Faserlaser) und
- Betriebsmodus (kontinuierlich oder gepulst). [12]

Heutzutage sind etwa 10.000 laseraktive Medien bekannt, mit denen Strahlung mit Wellenlängen zwischen 10 und 1.000.000 nm erzeugt werden können, so dass Laser mit verschiedenen Eigenschaften für die jeweilige Anwendung erhältlich sind. Für die Materialbearbeitung werden haupt-

sächlich Laser mit hohen Ausgangsleistungen verwendet. Die industriell am häufigsten eingesetzten Laser sind CO₂-, Nd:YAG- und Diodenlaser.

CO₂-Laser sind auf Grund ihrer Wellenlänge und der damit verbundenen geringen Absorption nur bedingt zum Schweißen von Kupferwerkstoffen geeignet.

Festkörperlaser unterscheiden sich durch das Medium, das aus einem mit laseraktiven Ionen dotierten Kristall besteht. Häufig wird ein mit Neodymionen (Nd) dotierter Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) in Stabform eingesetzt. Die Anregung erfolgt durch optische Pumpen mit Lampen oder Diodenlasern. Auf Grund seiner Wellenlänge kann dieses Licht mit Lichtleitfasern transportiert und somit weit entfernt von der eigentlichen Laserquelle genutzt werden. Der Wirkungsgrad dieser Systeme ist verhältnismäßig niedrig, da eine aufwändige Kühlung des laseraktiven Mediums erforderlich ist. Lampengepumpte Stablasers haben einen Wirkungsgrad von etwa 4 %. Durch das Pumpen mit Diodenlasern und den Einsatz von scheiben- oder faserförmigen Geometrien können Wirkungsgrade von rund 30 % erzielt werden. [12], [13]

Auch der Diodenlaser gehört zu den Festkörperlasern, wird aber im Gegensatz zu diesen direkt durch das Anlegen von Strom angeregt, wodurch die Umwandlung von elektrischer Energie in optische entfällt. Dies macht sich in einem erhöhten Wirkungsgrad (siehe Tab. 5) bemerkbar. Als Medium werden

dotierte Halbleiterkristalle eingesetzt. [12], [13]

Der Diodenlaser zeichnet sich durch eine kleine und kompakte Bauweise und ein geringes Gewicht aus. Er liefert eine hohe Leistungsdichte, hat jedoch eine verhältnismäßig schlechte Strahlqualität (große Strahldivergenz), weshalb er nicht zum Tiefschweißen eingesetzt werden kann. Er wird häufig zum Auftragschweißen oder zum Beschichten genutzt. [12] Zur Bearbeitung von Cu-Werkstoffen ist er wegen der schlechten Strahlqualität nicht geeignet.

Das zur Einschätzung der Schweißeignung eines Werkstoffes Ausschlaggebende Kriterium ist die Absorption bzw. Reflexion der Laserstrahlung. Deshalb ist der Einsatz des Laserstrahlschweißens für un- und niedriglegiertes Kupfer verhältnismäßig kompliziert [4], [7]. Auf Grund der bei den derzeit industriell eingesetzten Lasertypen geringen Absorption der Strahlung (siehe Abb. 15) zu Beginn des Schweißprozesses müssen Anlagen mit einer hohen Leistung eingesetzt werden (mind. 5 kW). Nach dem lokalen Aufschmelzen steigt die Absorption im Schmelzbad stark an und mit der Ausbildung der Dampfkapillare beträgt sie fast 100 %. Neuere Entwicklungen bei Festkörperlasern, z. B. Scheiben- oder Faserlaser, erzielen eine bessere Strahlqualität bei gleichzeitig höherem Wirkungsgrad (siehe Abb. 14). Sie verbessern die Schweißeignung von Kupfer, was sich an qualitativ besseren Bearbeitungsergebnissen zeigt. [41] Zur Vermeidung von Beschädigungen oder

	Glaslaser [12], [13]	Festkörperlaser [12], [13]	Diodenlaser [12], [13]	Faserlaser [41]
Medium	CO ₂	Nd:YAG	Halbleiter (z. B. GaAs)	Ytterbium
Aggregatzustand Medium	gasförmig	fest	fest	fest
Wellenlänge [µm]	10,6	1,06	0,75 ... 0,92	1,07
Anregung	Hochfrequenz oder Gleichstrom	optisch	Gleichstrom	optisch
Ausgangsleistung [kW]	0,1 ... 40	0,02 ... 6	bis 6	1 ... 50
Wirkungsgrad [%]	10 ... 15	4 ... 30	50	30
Betriebsmodus	gepulst und kontinuierlich	gepulst und kontinuierlich	gepulst und kontinuierlich	gepulst und kontinuierlich

Tabelle 5: Übersicht über wichtige Laserarten

Zerstörung der Laseroptiken durch Rückreflexion muss mit einem geeigneten Laserkopf gearbeitet werden. Durch den Einsatz neuer Punkt-schweißtechniken, z. B. das SHADOW- oder das Mikroring-Verfahren, wird eine ständige Bewegung des Strahls erreicht, was die Voraussetzung für ein reproduzierbares Laserstrahlfügen an Kupferwerkstoffen ist. Auch die Möglichkeit einer gezielten Pulsformung trägt zur Verbesserung der Qualität bei. Vorteilhaft ist außerdem, dass Laser mit verschiedensten Wellenlängen erhältlich sind (siehe Abb. 15). Kupfer hat im Bereich von etwa $0,6 \mu\text{m}$ einen Absorptionsgrad von rund 30 %, was ungefähr dem von Stahl für den Nd:YAG-Festkörperlaser entspricht. Mit einem Laser dieser Wellenlänge ist ein wirtschaftliches Fügen von unlegiertem Kupfer problemlos möglich, wenn diese mit den entsprechenden Leistungen erhältlich sind. Da Cu-Legierungen prinzipiell eine geringere Reflexion und einen höheren Absorptionsgrad als reines Kupfer aufweisen, können sie entsprechend besser laserstrahlgeschweißt werden. Eine Ausnahme bilden CuZn-Legierungen, die auf Grund der Zn-Ausdampfung und der so entstehenden porösen Schweißnähte mit zunehmendem Zn-Gehalt schlechter für das Laserstrahlschweißen geeignet sind [14]. Mit entsprechenden Maßnahmen zum Schutz der Laseroptik können jedoch Nähte von

ausreichender Qualität hergestellt werden.

In den letzten Jahren wurden Hybridprozesse entwickelt, die z. B. den Laser mit dem Metall-Schutzgasschweißen kombinieren und somit die Vorteile beider Verfahren kombinieren und die Nachteile, wie die geringe Spaltüberbrückbarkeit, kompensieren können. [7], [12], [15]

3.13 Lichtbogenbolzenschweißen

Unter Bolzenschweißen ist das Verbinden von stiftförmigen Teilen mit flächigen Werkstücken durch Pressschweißen zu verstehen. Der Bolzen wird mit einer Pistole oder einem Bolzensetzgerät auf das Werkstück aufgebracht. Das Anschmelzen der Oberfläche wird mit Hilfe eines Lichtbogens realisiert. Die Verbindung erfolgt im flüssigen Zustand der Schweißzone. Zum Schutz des Schmelzbades wird entweder mit Schutzgas oder mit einem Keramikring gearbeitet [DIN EN ISO 14555], [49], [61].

Vorteile dieses Verfahrens (783 bis 786) sind die kurzen Schweißzeiten und hohen Stromstärken, die einen geringen Einbrand ermöglichen und nur geringe Fügekräfte verlangen. Das Arbeiten ist durch die handlichen, leichten Pistolen in allen Positionen auch auf Baustellen möglich. Es werden Verbindungen hoher Festigkeit und Reproduzierbarkeit mit nur geringem Verzug hergestellt. Durch die ein-

fache und kostengünstige Gerätetechnik ist das Bolzenschweißen sehr wirtschaftlich. [61]

Die Verfahren „Kondensatorentladung-Bolzenschweißen mit Hubzündung (785)“ und „Kondensatorentladung-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung (786)“ kommen für Kupfer, CuZn-Legierungen und Mischverbindungen zur Anwendung. Einige Schweißparameter sind in nachfolgender Tabelle 6 zu finden.

3.14 Auftragschweißen

Das Auftragschweißen ist ein Beschichtungsverfahren und wird zu Reparaturzwecken sowie zum Erzeugen eines Werkstoffverbundes aus verschiedenen Materialien mit bestimmten Eigenschaften genutzt. Beim Auftragen von verschleißfesten Schichten wird vom Panzern, bei chemisch beständigen Schichten vom Plattieren und bei Werkstoffkombinationen mit Zwischenschichten aus Zusatzwerkstoff von Puffern gesprochen. [7], [49]

Das Auftragschweißen mit Kupfer wird vorzugsweise zum Oberflächenbeschichten von korrosionsbeanspruchten Bauteilen eingesetzt, die z. B. aufgrund der Bauteilgeometrie nicht aus walz- oder sprengplattierten Halbzeugen hergestellt werden können. Da die Beschichtung von Bauteilen mit Kupfer meist dem Korrosionsschutz dient, handelt es sich bei dieser Beschichtung um eine Schweißplattierung. Die



Abbildung 14: Laserstrahlgeschweißte Verbindung aus 4 mm dickem CuCn6, hart, mit 4 kW Faserlaser [41]

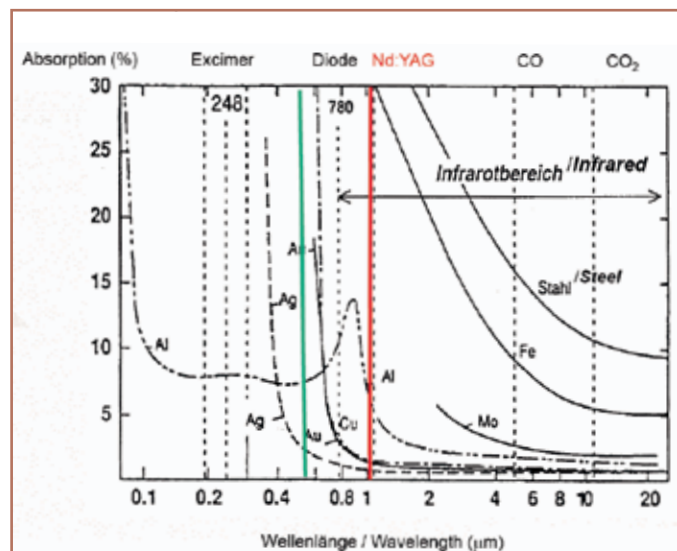


Abbildung 15: Wellenlängen sowie Absorptionsgrad verschiedener Materialien für Lasertypen [66]

	Bolzendurchmesser [mm]	Spitzenstrom [A]	Schweißzeit [ms]	Fügekraft [N]
Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Hubzündung	2 bis 8	5000	3 bis 10	< 100
Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung	2 bis 8	10000	1 bis 3	< 100

Tabelle 6: Schweißparameter für das Lichtbogenbolzenschweißen [61]

Schichtgüte ist in erster Linie von der Vermischung des angeschmolzenen Grundwerkstoffs mit dem Schichtwerkstoff abhängig, was vor Allem durch die Einbrandtiefe im Grundwerkstoff bestimmt wird. Kleine Auftragschweißungen werden in der Regel manuell mittels gebräuchlicher Verfahren der Lichtbogenschweißung ausgeführt, wobei auf niedrige Streckenenergie und geringe Aufschmelzung zu achten ist. Für die wirtschaftliche und technisch optimale Beschichtung von großflächigen Bauteilen mit korrosionsbeständigen metallischen Werkstoffen werden vorzugsweise Hochleistungsverfahren eingesetzt.

Für großflächige Schweißungen von Kupfer-Zusatzwerkstoff auf Stahl-Werkstoffe werden vor Allem das MIG-Impulsschweißen, das UP-Schweißen mit Bandedelektrode und das Elektroschlackeschweißen eingesetzt.

Für die Schweißplattierung von Stahl-Werkstoffen mit Kupfer-Werkstoffen wird vorzugsweise das **MIG-Impulsschweißen** angewendet, oft in Kombination mit dem WIG-Verfahren. Die Schweißparameter sind dahingehend zu optimieren, dass vor Allem Stahl-Aufschmelzungen und Loteindringung in Stahl so niedrig wie möglich gehalten werden.

Das Schweißplattieren nach dem **UP-Verfahren mit Bandedelektroden** aus Kupfer wurde eingehend untersucht [47]. Hierbei wurde an einer einschichtigen Schweißplattierung aus

Cu-DHP ein Cu-Gehalt von 95 % ermittelt. Es wurde weiterhin gefunden, dass die Zusammensetzung des Schweißpulvers die Schichtgüte in hohem Maße beeinflusst.

Das **Elektroschlackeschweißen ist dem UP-Verfahren** sehr ähnlich, arbeitet aber mit höheren Schweißgeschwindigkeiten und erzeugt einen geringeren Einbrand. Es kann auch für Kupfer anstelle des UP-Schweißens eingesetzt werden [85].

Schweißplattierungen aus Kupfer werden häufig an Dichtflächen der Flanschverbindungen von kupferplattierten oder mit Kupfer ausgekleideten Bauteilen aufgebracht, wobei die Beschichtung in der Regel an die Plattierungsaufgabe oder Auskleidung aus Kupfer gebunden wird.

Auch weitere Hochleistungsverfahren wie **Plasma-Pulver-Auftragschweißen** wurden untersucht. Dabei musste festgestellt werden, dass die Diffusion von Kupfer in den Stahlwerkstoff nur durch Aufbringen einer Zwischenschicht aus Ni verhindert werden kann [73]. Die Beschichtung bzw. Legierung von Kupfer mit dem Plasma- und dem WIG-Auftragschweißen konnte sowohl mit eisen- als auch mit nickelhaltigen Zusatzwerkstoffen durchgeführt werden. Damit konnte eine Erhöhung der Verschleißfestigkeit auf rund das Doppelte erreicht werden [77].

3.15 Nachbearbeitung

Wenn eine Nachbearbeitung nötig ist,

wird oft das Hämmern und/ oder Richten eingesetzt. Mit dem Hämmern werden die Festigkeitswerte der Schweißnaht positiv beeinflusst. Die Naht wird in der Rotwärme bei mehr als 700 °C durch das Hämmern eingeebnet und gleichzeitig wird das Gefüge verfeinert, das heißt die Gussstruktur der Wärmeeinflusszone und der Naht wird größtenteils in feines Rekrystallisationsgefüge umgewandelt. Außerdem werden Druckeigenspannungen eingebracht, so dass zähe und gut verformbare Verbindungen entstehen. Durch das Richten bekommt das Werkstück seine ursprüngliche Form zurück, die durch das Erwärmen und Abkühlen und die dabei entstandenen Spannungen verändert wurde. Auch eine erneute Wärmebehandlung kann nach dem Schweißen nötig werden, um eine vollständige Aushärtung bzw. einen Spannungsabbau im Werkstoff zu erreichen.

Schweißverfahren	Plasma-Heißdraht	Plasma-Pulver	Elektroschlacke	UP mit Bandedelektrode
Aufmischung [%]	< 5 ... 60	ca. 5	ca. 30 (Draht), 5 ... 10 (Band)	30 ... 60 (Drahtelektrode)
Schichtdicke [mm]	2 ... 7	0,5 ... 5	ca. 4 ... 5 mm	abhängig von eingesetzter Elektrode
Schichtbreite [mm]	20 ... 50	3 ... 5, 30 ... 35 mit Pendeln	abhängig von eingesetzter Elektrode	
Abschmelzleistung [kg/h]	10 ... 30	0,5 ... 10	13	10

Tabelle 7: Vergleich der Leistungsparameter verschiedener Auftragsschweißverfahren

4. Schweißbeignung von unlegierten Kupfersorten

Unlegiertes Kupfer besitzt nahezu kein Schmelzintervall (ca. 3 K). Deshalb tritt der Werkstoffübergang von fest zu flüssig rasch und ohne Farbänderung ein. Die entstehende Schmelze ist sehr dünnflüssig, weshalb eine Badsicherung oder das Schweißen von zwei Seiten notwendig ist und nur begrenzt Zwangslagenschweißungen durchgeführt werden können. Als Zusatzwerkstoffe werden darum vorrangig mit Ag oder Sn legierte Kupfer-Drähte oder -Stäbe verwendet (siehe Tab. 8). Diese Legierungen ermöglichen durch ihr Erstarrungsintervall eine bessere Modellierbarkeit der Schmelze [3]. Die hohe Wärmeleitfähigkeit der unlegierten Kupfer-Sorten erschränkt die Schweißbeignung ein. Da Cu-DHP im Vergleich zu anderen unlegierten Kupfer-Sorten phosphordesoxidiert und sauerstofffrei ist und eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt, ist dieser Werkstoff am besten schweißgeeignet und wird deshalb häufig im Bauwesen eingesetzt. In Abb. 9 ist ein rollen-nahtgeschweißter Meisterstutzen aus 0,6 mm dickem Cu-DHP Blech zu sehen.

Auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit von reinem Kupfer wird ein Vorwärmen der Bauteile empfohlen. Die Höhe der Vorwärmtemperatur richtet sich nach der Bauteildicke und dem Verfahren. Beim Gasschweißen entsteht durch das langsame Abkühlen eine sehr breite Wärmeeinflusszone. Sowohl in der Schweißnaht als auch in

der Wärmeeinflusszone ist nach dem Schweißen ein Grobkorngefüge vorhanden. In diesen Bereichen hat die Verbindung eine geringe Festigkeit und Härte und muss deshalb nachbehandelt werden. Dazu wird die Schweißnaht bei Temperaturen über 700 °C verformt („hammervergütet“), wodurch ein feinkörniges Gefüge durch Rekristallisation gebildet wird. Das führt zu einer deutlichen Festigkeitssteigerung.

Mit Schutzgasschweißverfahren sind qualitativ hochwertige Schweißnähte erzeugbar. Die beste Qualität wird mit dem WIG-Schweißen erreicht. Es wird bis zu einer Wandstärke von 4 mm einseitig ausgeführt. Für Wanddicken von 4 bis etwa 16 mm ist das gleichzeitig-beidseitige Schweißen mit zwei WIG-Brennern vorteilhafter, da mit dieser Technik die Vorwärmung wegen der konzentrierten Wärmeeinbringung reduziert werden kann. Selbst bei Blechen bis 12 mm Wanddicke ist nur am Nahtanfang bzw. bei Schweißbeginn ein Vorwärmen auf 300 bis 400 °C (für Schweißen mit Ar) erforderlich. Diese Technik wird aber nur selten eingesetzt. Sie liefert im Vergleich zum einseitigen WIG-Schweißen einen geringeren Verzug. Durch die konzentrierte Wärmeeinbringung sind auch Heftstellen zulässig. Auf Grund der großen Wärmedehnung sollten längere Nähte aber mit Klemmfixierung geschweißt werden [3]. Das einseitige WIG-Schweißen von Blechdicken ab 4 mm erfordert hohe Vorwärmtemperaturen

von 500 bis 600 °C und große Schweißverfahren.

Das MIG-Verfahren erreicht im Vergleich zum WIG-Verfahren höhere Energiekonzentrationen. Dadurch sind höhere Abschmelzleistungen sowie größere, zu verschweißende Blechdicken möglich. Das Verfahren wird bei großen Wandstärken und großen Mengen an Zusatzwerkstoff eingesetzt. Punkt- und Rollennahtschweißen ist wegen der hohen Leitfähigkeit nur bei geringen Blechdicken anwendbar. Die Stumpfschweißverfahren sind für das Fügen besser geeignet.

Anderer Verfahren zum Verschweißen von unlegiertem Cu sind das Kaltpress-, Ultraschall-, Reib- und Rührreib- sowie das Diffusionsschweißen. Da die thermische und elektrische Leitfähigkeit bei diesen Verfahren nur einen geringen Einfluss hat, sind sie für größere Querschnitte und Blechstärken als das Punkt- und Rollennahtschweißen einsetzbar.

Die hohe Reflexion des Kupfers ist beim Laserstrahlschweißen zu berücksichtigen. Mit einem Faserlaser mit 4 kW Leistung können Bleche bis 4 mm Dicke verschweißt werden. Das Elektronenstrahlschweißen eignet sich gut für das sauerstofffreie Kupfer Cu-OF. Sauerstoffhaltige Kupfer-Sorten erweisen sich beim Elektronenstrahlschweißen als rissanfällig. Bei Cu-PHC/ Cu-HCP wird Porenanfälligkeit beobachtet. Als Ursache hierfür können im Grundwerkstoff verbliebene Desoxidationsrückstände (Rest-Phosphor-Gehalt)



Abbildung 16: WIG-geschweißte Doppellamellenverbindung aus Cu-ETP mit Zusatzwerkstoff CuSn1 unter Ar, Grundplatte 15 mm, Lamellen je 0,5 mm [81]



Abbildung 17: WIG-geschweißter Stromring aus 6 mm Cu-ETP mit Zusatzwerkstoff CuAg1 unter Ar, V-Naht mit Kohlebadabsicherung [82]

angesehen werden [17], [59]. Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen ergaben, dass mit zunehmender Beanspruchungstemperatur ein deutlicher Abfall von Festigkeit, Dehnung und Einschnürung in der Schweißnaht zu verzeichnen ist, während die 0,2 %- Dehngrenze etwa das gleiche Verhalten wie der Grundwerkstoff zeigt [18], [19]. Die Versprödung tritt bei Temperaturen oberhalb 200°C ein. Als Ursache dieses ausgeprägten Dehnungsabfalls wird eine kritische Ausscheidungsbelegung von Spurenelementen geringer Löslichkeit an den Korngrenzen der faserartigen Stengelkristalle angenommen [20]. Untersuchungen [21] haben gezeigt, dass an elektronenstrahlgeschweißten Kupferblechen aus Cu-OF und Cu-PHC/ Cu-HCP im weichen, halbhartem und hartem Zustand sowohl mit schmaler als auch mit breiter Nahtgeometrie stets ein Temperaturbereich mit deutlich verminderter Duktilität vorliegt, wobei eine Temperatur ab 200°C als kritisch anzusehen ist. Im Temperaturbereich von 300 °C bis 420 °C wird deutlich ausgeprägte Warmsprödigkeit beob-

achtet [21]. Die Ursachen der Versprödung werden auf eine ungünstige Gefügestruktur im Schweißgut und auf Eigenspannungszustände in der Naht zurückgeführt, wodurch bei statischer Beanspruchung die Bildung von interkristallinen Poren begünstigt wird, was schließlich zum Abschälen der Korngrenze führt. Dieser Vorgang wird vermutlich unterstützt durch S- und Bi-Ausscheidungen [21].

unlegierte Kupfersorten	n i c h t aus Cu-CATH-1 (CR001A) nach EN 1978 hergestellt		
		Sauerstoffgehalt in % ¹⁾	Phosphorgehalt in % ¹⁾
sauerstoffhaltig	Cu-ETP	max. 0,040 (bis 0,060 möglich, wenn zwischen Käufer und Lieferant vereinbart)	nicht gesondert festgelegt
	Cu-FRHC		nicht gesondert festgelegt
	Cu-FRTP	max. 0,100	nicht gesondert festgelegt
sauerstofffrei, nicht mit P desoxidiert	Cu-OF	- ²⁾	nicht gesondert festgelegt
sauerstofffrei mit P desoxidiert	Cu-PHC	- ²⁾	0,001 bis 0,006
	Cu-HCP	- ²⁾	0,002 bis 0,007
	Cu-DLP	nicht gesondert festgelegt	0,005 bis 0,013
	Cu-DXP	nicht festgelegt	0,040 bis 0,060
	Cu-DHP	nicht festgelegt	0,015 bis 0,040

unlegierte Kupfersorten	aus Cu-CATH-1 (CR001A) nach EN 1978 hergestellt		
		Sauerstoffgehalt in % ¹⁾	Phosphorgehalt in % ¹⁾
sauerstoffhaltig	Cu-ETP1	max 0,040	(As+Cd+Cr+Mn+P+Sb) max. 0,0015
sauerstofffrei, nicht mit P desoxidiert	Cu-OF1	- ²⁾	(As+Cd+Cr+Mn+P+Sb) max. 0,0015
	Cu-OFE	- ²⁾	0,0003
sauerstofffrei, mit Phosphor desoxidiert	Cu-PHCE	- ²⁾	0,001 bis 0,006

¹⁾ Unter %-Angaben ist immer der Massengehalt in % zu verstehen.

²⁾ Der Sauerstoffgehalt muss vom Hersteller so eingestellt werden, dass der Werkstoff die Anforderungen zur Wasserstoffbeständigkeit nach EN 1976 erfüllt.

Tabelle 8: chemische Zusammensetzung unlegierter Kupfersorten.

5. Schweißbeignungen von Kupferlegierungen

5.1 Allgemeines

Die elektrische und thermische Leitfähigkeit von Kupfer wird durch verschiedene Elemente wie P, Fe, Co, Si, Cd, Ag, Ni, Zn, Sn und Al teilweise stark reduziert. Dies wirkt sich häufig positiv auf die Schweißbeignung von Cu-Legierungen aus, da weniger oder nicht mehr vorgewärmt werden muss. Ab 10 bis 15 mm Blechdicke ist trotzdem ein Vorwärmen empfehlenswert [3]. Einige Elemente, z.B. Mn, Si und Al verbessern auf Grund ihrer desoxidierenden Wirkung die Schweißbarkeit sauerstoffhaltiger Legierungen. Wie bereits in Tab. 2 gezeigt, können andere Elemente wie z.B. Pb jedoch auch negative Auswirkungen auf die Schweißbeignung haben. Außer beim MIG-Schweißen wird für die meisten Kupferlegierungen der Einsatz von Flussmitteln beim Schmelzschweißen empfohlen. Es kommen mit Ausnahme von CuAl-Legierungen die gleichen Flussmittel

wie bei unlegiertem Cu zum Einsatz (siehe Kap. 4). Außer CuZn-Legierungen, die häufig noch autogen geschweißt wird, hat sich das Schutzgas- und Plasmaschweißen auch für Kupferlegierungen durchgesetzt. In den folgenden Kapiteln werden die Hauptlegierungsgruppen der Kupferwerkstoffe, die nach ISO/TR 15608 eingeteilt wurden, näher erläutert.

5.2 Niedrig legierte Kupferwerkstoffe

Niedrig legierte Kupferwerkstoffe enthalten Legierungszusätze bis maximal 5 %, die vorwiegend in der Elektrotechnik, aber auch für bestimmte Einsatzbereiche im Apparatebau zur Anwendung kommen. Die Knetlegierungen können eingeteilt werden in

- nicht aushärtbar und
- aushärtbar.

Während viele Knetlegierungen ge-

normt sind, ist nur ein niedrig legierter aushärtbarer Gusswerkstoff, CuCr-C, in der DIN CEN/TS 13388 zu finden.

5.2.1 Nicht aushärtbare Legierungen

5.2.1.1 Allgemeines

Bei diesen Legierungen ist eine Steigerung der mechanischen Festigkeit im Allgemeinen nur durch Kaltumformung möglich. Es ist zu beachten, dass beim Schweißen die Festigkeitseigenschaften (Zugfestigkeit, 0,2 %-Dehngrenze) des wärmebeeinflussten Grundwerkstoffs in der Regel einen deutlichen Abfall erleiden (siehe Kap. 2.3).

5.2.1.2 Kupfer-Silber

Die hochleitfähigen CuAg-Legierungen mit 0,03 bis 0,12 % Ag ($\lambda \sim 380 \dots 385 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $K \sim 54 \dots 57 \text{ MS/m}$) werden in der Elektronik für Kommutatorlamellen und Ankerwicklungen sowie als Elektrodenwerkstoffe für Widerstandsschweißmaschinen eingesetzt. Beim

Legierungstyp	nicht aushärtbar				
	Cu-S	Cu-Te	Cu-Ag	Cu-Ag	Cu-Si-Mn
Vertreter	CuSP	CuTeP	CuAg0,1	CuAg0,1P	CuSi3Mn1
elektrische Leitfähigkeit in MS/m	54 ... 55	≈ 54,5	55 ... 57	54 ... 56	3,8 ... 4
Wärmeleitfähigkeit bei 20° C in W/(m·K)	370 ... 375	≈ 368	≈ 385	≈ 380	38
Rp0,2 ca. in N/mm²	50	50	250 ... 360		260 ... 890
Rm min. in N/mm²	200 ... 260	200 ... 260	250 ... 360		380 ... 900
A min. in%	7 ... 35	7 ... 35	2 ... 20		8 ... 50
Entfestigungstemperatur	> 300° C	> 350° C	> 350° C		-
Zerspanen	-	+	++		++
Umformen					
kalt	++	++	-		-
warm	+	+	++		++
Schutzgasschweißen	0	++	+		+
Anwendung	Klemmen in der Elektronik, Automatenrehteile, Düsen für Schweiß- und Schneidbrenner	Basen für Dioden und Transistoren, Schrauben, Muttern, Schweißbrennerdüsen	Kommutatorlamellen, Induktoren, PKW-Kühler, Druckplatten für das graphische Gewerbe		Bauteile im (chemischen) Apparatebau, Schrauben, Bolzen, Muttern, Flansche
Eigenschaften	gute Korrosionsbeständigkeit	gute Korrosionsbeständigkeit	hohe Zeitstandsfestigkeit		geringe elektrische Leitfähigkeit, sehr hohe Festigkeit, bessere Korrosionsbeständigkeit als unlegiertes Cu
	giftige Dämpfe und Stäube beim Schweißen und Zerspanen				

Tabelle 9: Eigenschaften, chemische Zusammensetzung und Anwendung von einigen nicht aushärtbaren, niedrig legierten Kupferwerkstoffen

Schmelzschweißen verhalten sie sich wie Rein-Cu. An den sauerstoffhaltigen Legierungen CuAg0,04, CuAg0,07 und CuAg0,1 sind wegen der Neigung zur Versprödung durch Wasserstoffkrankheit brauchbare Schutzgasschweißungen nur bei vorsichtiger Handhabung und ausreichender Erfahrung zu erzielen. Die sauerstofffreien Sorten CuAg0,04P, CuAg0,07P und CuAg0,1P mit 0,001 bis 0,007 % P sind nach allen Verfahren mit den Schweißzusätzen CuSn1 und CuAg1 nach DIN EN 14640 bzw. ISO 24373 einwandfrei schmelzschweißbar. CuAg1 sollte beim Schmelzschweißen nur bei besonderen Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit der Schweißverbindung bevorzugt werden. Die sauerstofffreien, nicht desoxidierten Sorten CuAg0,04(OF), CuAg0,07(OF) und CuAg0,1(OF) enthalten kein P und weisen deshalb eine sehr hohe Leitfähigkeit auf. Sie sind unter Beachtung dieser Eigenschaft ebenfalls mit allen Verfahren und den gleichen Schweißzusätzen schmelzschweißbar. Für die Anwendbarkeit der Widerstands- und Strahlschweißverfahren sowie für Kaltpress-, Ultraschall-, Reib- und Rührreib- und das Diffusionsschweißen gelten die gleichen Angaben wie bei unlegiertem Kupfer.

5.2.1.3 Kupfer-Magnesium

CuMg-Legierungen mit 0,3 bis 0,8 % Mg und hoher Leitfähigkeit ($\lambda \sim 120 \dots 240 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $K \sim 18 \dots 36 \text{ MS/m}$) müssen als Werkstoffe für Freileitungen kaum durch Schmelz- oder Strahlschweißen verbunden werden; es liegen daher wenig Erfahrungen vor.

Von den Widerstandsschweißverfahren wird das Pressstumpfschweißen zum Verbinden von Drähten eingesetzt. Auch das Ultraschall-, Kaltpress-, Reib- und Rührreib- sowie das Diffusionsschweißen können angewendet werden.

5.2.1.4 Kupfer-Schwefel

CuS-Legierungen sind Zerspanungswerkstoffe hoher Leitfähigkeit ($\lambda \sim 370 \dots 375 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $K \sim 54 \dots 55 \text{ MS/m}$) mit 0,2 bis 0,7 % S und 0,003 bis 0,012 % P. Wegen der Sprödigkeit der Schweißzone ist das Schmelzschweißen (inklusive Strahlschweißen) nicht zu empfehlen [4]. Am besten werden Verbindungen

hart- oder weichgelötet. Von den Widerstandsschweißverfahren sind wegen der hohen Leitfähigkeit Punkt- und Rollennahtschweißen nur bei dünnen Blechen und die Stumpfschweißverfahren nur bei kleinen Querschnitten anwendbar. Verfahren wie Kaltpress-, Ultraschall-, Rührreib- und Diffusionsschweißen, mit denen eine Verbindung im festen Zustand erzeugt wird, sind besser, das Reibschweißen ist wegen des möglichen Schmelzflusses nur bedingt geeignet.

5.2.1.5 Kupfer-Tellur

CuTe-Legierungen enthalten 0,4 bis 0,7 % Te zur Verbesserung der Zerspanbarkeit und 0,003 bis 0,012 % P zur Gewährleistung der Wasserstoff-Beständigkeit. Sie sind hervorragende Werkstoffe für Drehteile aller Art, an die hohe Anforderungen bezüglich Leitfähigkeit ($\lambda \sim 368 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $K \sim 54,5 \text{ MS/m}$) gestellt werden. CuTeP wird selten durch Schmelzschweißen verbunden, weil es zur Rissbildung und Porigkeit neigt [4]. Die Wärmeeinflusszone weist nur eine geringe Zähigkeit auf. Insbesondere bei hochbeanspruchten Teilen oder Verbindungen, die aufgrund ihrer Konstruktion leicht zur Rissbildung führen können, sollte auf das Schmelzschweißen verzichtet und Fügen am besten durch Hart- oder Weichlöten ausgeführt werden.

Für das Widerstandsschweißen und die anderen, in Kap. 5.2.1.4 aufgeführten Verfahren gelten die gleichen Angaben wie für Kupfer-Schwefel.

5.2.1.6 Kupfer-Zink

Bei CuZn-Legierungen mit 0,1 bis 1,0 % Zn ist die Leitfähigkeit ($\lambda \sim 385 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $K \geq 52 \text{ MS/m}$) höher als diejenige von Cu-DHP.

Diese Legierung wird z. B. für Konstruktionsteile, Wärmetauscher-elemente und wegen ihrer ausgezeichneten Tiefziehfähigkeiten zur Herstellung von Hohlwaren aller Art verwendet. Durch den Zn-Gehalt ist die Legierung sauerstofffrei. Das Schmelzschweißen ist sowohl mit Hilfe des Gasschweißens als auch des WIG-Verfahrens möglich. Als Schweißzusätze kommen CuAg1 oder CuSn1 nach DIN EN 14640 bzw. ISO 24373 zur Anwendung. Der Einsatz von

Flussmitteln ist zu empfehlen.

Von den Widerstandsschweißverfahren sind Punkt- und Rollennahtschweißen wegen der hohen Leitfähigkeit nur mit Einschränkung anwendbar.

Durch den geringen Zusatz von Zn sind keine Schwierigkeiten durch das Ausdampfen desselben zu erwarten.

Stumpf- und Strahlschweißverfahren sind deshalb gut zum Fügen von Bauteilen aus dieser Legierung geeignet. Verfahren, mit denen eine Verbindung im festen Zustand erzeugt wird, wie Kaltpress-, Ultraschall-, Reib-, Rührreib- und Diffusionsschweißen, sind ebenfalls sehr gut einsetzbar.

5.2.1.7 Kupfer-Blei

CuPb-Legierungen sind zerspanbare Automatenwerkstoffe hoher Leitfähigkeit ($\lambda \sim 350 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $K \sim 50 \text{ MS/m}$) mit ca. 1 % Pb und ca. 0,01 % P, die z. B. für Steckverbinder und andere elektronische Anwendungen eingesetzt werden.

Wegen des Pb-Gehaltes sind Schmelz- und Strahlschweißen ebenso wie das Widerstandsschweißen nicht zu empfehlen. Am besten werden Verbindungen hart- oder weichgelötet.

Verfahren wie Kaltpress-, Ultraschall-, Rührreib- und Diffusionsschweißen, mit denen eine Verbindung im festen Zustand erzeugt wird, sind etwas besser, das Reibschweißen wegen des möglichen Schmelzflusses nur bedingt geeignet.

5.2.1.8 Kupfer-Silizium

CuSi- und CuSiMn-Legierungen mit 0,8 bis 3,2 % Si und 0,7 bis 1,3 % Mn haben ausgezeichnete mechanische Eigenschaften. Sie sind beständig gegen viele Säuren, Laugen sowie Salzlösungen und finden vorwiegend im allgemeinen Apparatebau Anwendung. Die Wärmeleitfähigkeit dieser Legierungen entspricht etwa der von Stahl. In Kombination mit der desoxidierenden Wirkung von Mn besitzt diese Werkstoffgruppe eine gute Schweißbarkeit. Von den Schmelzschweißverfahren sind Gas- und Lichtbogenhandschweißen nicht anwendbar. Es wird ausschließlich das WIG- und MIG-Schweißen eingesetzt. Die Festigkeitseigenschaften dieser Schweißverbindungen genügen den Anforderungen des Druckbehälterbaus.

	aushärtbar					
Legierungstyp	Cu-Be	Cu-Co-Be	Cu-Cr	Cu-Cr-Zr	Cu-Ni-Si	Cu-Zr
Vertreter	CuBe2	CuCoBe2	CuCr1	CuCr1Zr	CuNi2Si	CuZr
elektrische Leitfähigkeit in MS/m	8 ... 18	25 ... 32	26 ... 47	26 ... 48	10 ... 23	26 ... 54
Wärmeleitfähigkeit bei 20° C in W/(m·K)	92 ... 125	192 ... 239	167 ... 314	167 ... 320	67 ... 120	167 ... 330
R _{p0,2} ca. in N/mm ²	140 ... 1150	140 ... 730	60 ... 380	60 ... 380	90 ... 620	40 ... 260
R _m min. in N/mm ²	420 ... 1300	250 ... 800	200 ... 470	200 ... 470	260 ... 640	180 ... 350
A min. in %	2 ... 35	5 ... 25	8 ... 30	8 ... 30	8 ... 35	18 ... 30
Entfestigungstemperatur	> 350° C	> 500° C	> 475° C	> 500° C	> 450° C	-
Zerspanen	+	+	0	0	0	0
Umformen kalt	0	0	0	0	0	0
warm	+	+	++	+	+	+
Schutzgasschweißen	+	+	+	+	+	+
Anwendung	technische Federn und Membranen, funksichere Werkzeuge, Zahn- und Schneckenräder, Spritzgussformen	stromführende Federn, Schweißelektroden	stromführende Federn, Stranggusskokillen, Elektrodenhalter und Einblasdüsen in Elektroöfen	stromführende Federn, Lagerbuchsen, höherfeste korrosionsbeständige Schrauben, Oberleitungen	Klemmen für Freileitungen	Kommutatorlamellen, Elektroden für Nahtschweißmaschinen
Eigenschaften	gute Korrosionsbeständigkeit, hohe Verschleißbeständigkeit, kaltzäh bis -200° C	gute elektrische und thermische Leitfähigkeit, hohe Aushärtungsgeschwindigkeit	relativ hohe Kerbempfindlichkeit	gute Zeitstandsfestigkeit	gute Festigkeit, gute Verschleißbeständigkeit, hohe Korrosionsbeständigkeit	hohe elektrische Leitfähigkeit nach Aushärtung, gute Zeitstandsfestigkeit

Tabelle 10: Eigenschaften, chemische Zusammensetzung und Anwendung von einigen aushärtbaren, niedrig legierten Kupferwerkstoffen

Beim WIG-Verfahren wird mit Gleichstrom und dem Zusatzwerkstoff CuSi3Mn1 nach DIN EN 14640 bzw. ISO 24373 geschweißt. Bei mehrlagigen Schweißnähten sollte die Oxidhaut auf den Zwischenlagen vor dem Überschweißen durch scharfes Bürsten aufgerissen und das Schweißbad wegen der Heißrisse neigung möglichst schmal gehalten werden. Diese Legierungen weisen bei Temperaturen zwischen 950 °C und 800 °C einen Bereich der Warmsprödigkeit auf, der beim Schweißen und auch beim Umformen an geschweißten Bauteilen berücksichtigt werden muss. Für das MIG-Schweißen gelten die gleichen Ausführungen wie beim WIG-Schweißen. Widerstands- und Stumpfschweißverfahren sind wegen der niedrigen Leitfähigkeit gut anwendbar.

Kaltpress-, Ultraschall-, Reib-, Rührreib- und Diffusionsschweißen sind ebenfalls gut geeignet.

5.2.2 Aushärtbare Legierungen

5.2.2.1 Allgemeines

Bei dieser Legierungsgruppe ist eine Festigkeitssteigerung außer durch Kaltumformung vor Allem durch geeignete Wärmebehandlung möglich. Wie bereits in Kap. 2.3 beschrieben, geht die Festigkeitssteigerung durch Aushärtung beim Aufschmelzen und Erstarren des Grundwerkstoffes verloren. Durch eine dem Schweißen nachgelagerte Wärmebehandlung und erneutes Auslagern kann dieser Effekt rückgängig gemacht werden. Da dies jedoch zusätzliche Kosten verursacht und teilweise auf Grund der Bauteilgröße nicht möglich ist, sollten im

Vorfeld Maßnahmen zur Reduzierung bzw. Vermeidung des Festigkeitsabfalls getroffen werden. Das ist z. B. durch eine geringe Wärmeeinbringung und geeignete Zusatzwerkstoffe möglich. Aus den genannten Gründen ist der Einsatz von Schweißverfahren, bei denen der Grundwerkstoff nicht aufgeschmolzen wird, zu bevorzugen.

5.2.2.2 Kupfer-Beryllium

CuBe-Legierungen enthalten 1,6 bis 2,1 % Be (und maximal 0,3 % Ni sowie maximal 0,3 % Co). Sie werden als aushärtbare Werkstoffe hoher Festigkeit und Leitfähigkeit ($\lambda \sim 92 \dots 125$ W/m·K; $K \sim 8 \dots 18$ MS/m) für Federn aller Art, verschleißfeste Teile und nichtfunkende Werkzeuge verwendet. Grundsätzlich können alle bekannten Verfahren zum Verschweißen von Teilen aus CuBe-Legierungen angewendet

werden, wobei immer auf saubere, oxidfreie Oberflächen zu achten ist [22], [23]. Beim Schweißen von CuBe-Legierungen kann es jedoch zu Rissen in der Wärmeeinflusszone kommen [42].

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass, je nach Höhe der Wärmeeinbringung, der Aushärtungseffekt in der Wärmeeinflusszone teilweise oder vollständig abgebaut wird. Dies ist besonders beim Autogenschweißen deutlich ausgeprägt. Sofern sich das Schmelzschweißen aus fertigungstechnischen Gründen nicht vermeiden lässt, sollten das WIG- oder MIG-Schweißen mit Zusatzwerkstoffen auf der Legierungsbasis CuAl angewendet werden. Für das WIG-Schweißen können auch Zusatzwerkstoffe eingesetzt werden, die der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffs ähnlich sind. Es ist darauf hinzuweisen, dass CuBe-Legierungen grundsätzlich auch für das Schutzgasschweißen als bedingt schweißgeeignet gelten. Das Elektronenstrahlschweißen bietet sich aufgrund der sehr niedrigen Streckenergie zum Schweißen dieser Legierungen an und hat sich hierfür gut bewährt. Geschweißte Verbindungen verhalten sich bezüglich ihrer Festigkeitseigenschaften weitgehend wie der Grundwerkstoff [20]. Das Laserstrahlschweißen ist im Dünnblechbereich ebenfalls möglich. Von den Widerstandsschweißverfahren sind die Stumpfschweißverfahren gut geeignet. Auf ausgehärteten Federn können an unkritischen Stellen auch durch Punktschweißen Kontakte auf-

gebracht werden, sofern die Schweißzeiten kurz sind.

Kaltpress-, Ultraschall-, Reib-, Rührreib- und Diffusionsschweißen ist ebenfalls anwendbar.

5.2.2.3 Kupfer-Eisen

CuFe-Legierungen mit 2,1 bis 2,6 % Fe und kleinen Gehalten an P sind Werkstoffe mit guter Leitfähigkeit ($\lambda \sim 200 \dots 260 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $K \sim 17 \dots 38 \text{ MS/m}$) und werden in der Elektronik, z. B. für Steckkontakte in der Halbleiterfertigung sowie im Elektro- und Fahrzeugbau, z. B. für Strom leitende Federn, verwendet. Die Legierung ist sauerstofffrei.

Von den Schmelzschweißverfahren sind das Gas- und vor allem das Schutzgasschweißen (WIG und MIG) gut geeignet. Als Schweißzusätze kommen CuAg1 oder CuSn1 nach DIN EN 14640 bzw. ISO 24373 in Frage. Der Einsatz von Flussmitteln ist empfehlenswert.

Bei den Widerstandsschweißverfahren mit einer Elektrode aus W, Mo oder Mo-Basislegierungen besteht das Problem des Anlegierens von Fe an den Elektrodenwerkstoff. Andere Elektroden sind noch nicht verfügbar. Das Verfahren ist für diesen Werkstoff deshalb nicht zur Massenfertigung geeignet.

Alle besprochenen Strahlschweißverfahren sind anwendbar. Dies gilt ebenso für Kaltpress-, Ultraschall-, Reib-, Rührreib- und Diffusionsschweißen.

5.2.2.4 Kupfer-Kobalt-Beryllium

CuCoBe-Legierungen mit 2,0 bis 2,8 %

Co und 0,4 bis 0,7 % Be sind ebenfalls aushärtbare Legierungen. Wegen ihrer vergleichsweise hohen Leitfähigkeit ($\lambda \sim 192 \dots 239 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $K \sim 25 \dots 32 \text{ MS/m}$ nach Aushärtung auf maximale Festigkeit) wird sie auch als „Beryllium-Leitbronze“ bezeichnet. Sie ist ein hervorragender Werkstoff für Widerstands-Schweißelektroden, wird aber auch in großem Umfang für Strom führende Federn eingesetzt.

Für das Schweißen gelten die unter 5.2.2.2 für CuBe gemachten Ausführungen auch für CuCoBe. Ausnahme ist das Elektronenstrahlschweißen, das bei zirkonhaltigen Legierungen zu Rissen führen kann.

5.2.2.5 Kupfer-Nickel-Beryllium

Bei dieser Legierung wurde Co teilweise durch Ni ersetzt (1,4 bis 2,4 % Ni und 0,2 bis 0,6 % Be). In den mechanischen und physikalischen Eigenschaften ist diese Legierung praktisch identisch mit der bewährten Legierung CuCoBe.

5.2.2.6 Kupfer-Chrom-Zirkon

Die CuCrZr-Legierung ist durch eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit und eine hohe Temperaturbeständigkeit gekennzeichnet. Sie enthält 0,5 bis 1,2 % Cr und 0,03 bis 0,3 % Zr und wird als Elektrodenwerkstoff für Widerstandsschweißmaschinen eingesetzt.

Dieser Werkstoff lässt sich jedoch nur unter großen Schwierigkeiten schmelzschweißen [4]. Wenn überhaupt, wird er meist im lösungsgeglühten Zustand nach dem WIG- oder MIG-Verfahren

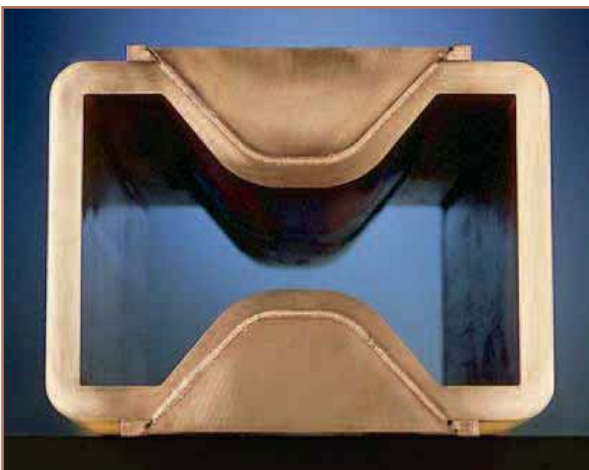


Abbildung 18: Mit dem Elektronenstrahl eingeschweißte Passtücke an Eingusskokillen aus CuCrZr für die Stahlindustrie (Einschweißtiefe: 40 mm) [56]

unter Verwendung von CuSn1 als Zusatz geschweißt, und zwar im Allgemeinen in Bereichen, in denen eine Einbuße an Härte ohne Bedeutung ist. Erneutes Homogenisieren kann erforderlich werden. Mit den Strahlschweißverfahren, insbesondere dem Elektronenstrahlschweißen, ist dieser Werkstoff ebenfalls ffügbar. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 18 zu finden. Ansonsten ist für das Fügen das Weichlöten zu empfehlen, denn auch beim Hartlöten können Festigkeitsverluste auftreten. Von den Widerstandsschweißverfahren kommt das Stumpfschweißen in Betracht. Punkt- und Rollennahtschweißen sind wegen der hohen Leitfähigkeit nur an dünnen Querschnitten anwendbar. Kaltpress-, Ultraschall-, Reib-, Rührreib- und Diffusionsschweißen sind hingegen gut geeignet.

5.2.2.7 Kupfer-Nickel-Silizium

CuNiSi-Legierungen mit 1,0 bis 4,5 % Ni und 0,4 bis 1,3 % Si sind aushärtbare Werkstoffe für Freileitungsarmaturen, Schrauben und Bolzen ($\lambda \sim 59 \dots 126 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $K \sim 8 \dots 24 \text{ MS/m}$). Sie lassen sich grundsätzlich wie unlegier-

tes Cu schmelzschweißen. Es ist zu beachten, dass die Schweißnähte und die wärmebeeinflussten Zonen etwa die gleichen Festigkeitseigenschaften wie der weichgeglühte Grundwerkstoff haben.

Alle Widerstandsschweißverfahren und die für unlegiertes Cu aufgeführten Verfahren sind anwendbar.

5.2.2.8 Kupfer-Nickel-Blei

CuNiPb-Legierungen sind Werkstoffe mit hoher Festigkeit, guter Zerspanbarkeit und guter Leitfähigkeit ($\lambda \sim 245 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $K > 32 \text{ MS/m}$) mit ca. 1 % Ni und Pb sowie ca. 0,25 % P. Eingesetzt wird diese Legierung z.B. für zerspanend hergestellte Steckverbinder in der Elektronik und Elektrotechnik. Wegen des Pb-Gehaltes sind Schmelz- und Strahlschweißen ebenso wie das Widerstandsschweißen und auch das Hartlöten nur bedingt geeignet. Am besten werden Verbindungen weichgelötet.

Verfahren wie Kaltpress-, Ultraschall-, Rührreib- und Diffusionsschweißen, mit denen eine Verbindung im festen Zustand erzeugt wird, sind etwas besser, das Reibschweißen wegen des

möglichen Schmelzflusses nur bedingt geeignet.

5.3 Hochlegierte Kupferwerkstoffe

5.3.1 Allgemeines

Hochlegierte Kupferwerkstoffe bestehen zu mehr als 5 % aus Legierungselementen. Beispiele für die Schweiß-eignung sowie die Verwendung einiger Legierungen sind in Tab. 11 aufgeführt.

5.3.2 Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)

CuZn-Legierungen (Messing) enthalten Zn als Hauptlegierungselement. Eini-gen Legierungen wird zur Verbesserung der Zerspanbarkeit bis zu 3 % Pb zugesetzt. Anderen Legierungen (Mehrstoff-Legierungen) werden zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften Elemente wie Al, Fe, Ni, Mn, Si und Sn, zugegeben.

Al und Sn erhöhen die Festigkeit und Korrosions- sowie Erosionsbeständigkeit. Sie engen den α -Bereich ebenfalls ein. Durch Ni wird die Korrosionsbeständigkeit erhöht, Mn wird in Verbindung mit Al und Si zur Verbesserung der Gleiteigenschaften und zur

	Schweiß-eignung für			Anwendungshinweise
	Gas	WIG	MIG	
Knetlegierungen				
CuZn37 R300	sehr gut	gut *	gut **	Hauptlegierung für Kaltumformen, Kühlerbänder, Schrauben, Druckwalzen, Seewasserleitungen
CuZn20Al2 R330	schlecht	sehr gut	gut **	
CuSn6 R350	gut	sehr gut	sehr gut	Bleche für Apparatebau, Rohre, Federn, Gleitlagerbuchsen, abrieb- und korrosionsfest
CuSn8 R370	gut	sehr gut	sehr gut	
CuNi10Fe1Mn R300	schlecht	sehr gut	sehr gut	Apparatebau, Meerestechnik, Meerwasserentsalzung, Kondensatoren, Wärmetauscher, kavitationsbeständig
CuNi30Mn1Fe R350	schlecht	sehr gut	sehr gut	
CuAl8Fe3 R480	schlecht	sehr gut	sehr gut	hohe Festigkeit, chemischer Apparatebau
CuAl10Ni5Fe4 R630	schlecht	sehr gut	sehr gut	Kondensatorböden, Verschleißteile, Wellen, Lagerteile, Papierindustrie (Saugwalzen)
Gusslegierungen				
CuZn34Al2-C	schlecht	gut *	gut **	Ventilsitze, Steuerungsteile, Kegel
CuZn15Si4-C	gut	gut *	gut **	Maschinenbau, Schiffbau, Elektroindustrie
CuSn10-C	gut	gut	gut	Armaturen, Pumpen, Gleitlager
CuSn10Zn-C	schlecht	gut	gut	Gleitlagerschalen, Schnecken
CuNi10-C	schlecht	gut	gut	Chemische Industrie, Meerestechnik, Meerwasserentsalzung, Pumpen
CuNi30-C	schlecht	sehr gut	sehr gut	
CuAl10Fe-C	schlecht	gut	gut	Schaltgabeln, Ritzel, Kegelräder
CuAl10Ni-C	schlecht	gut	gut	Schiffspropeller, Heißdampfarmaturen

* Zinkfreier Zusatzwerkstoff empfohlen ** Zinkfreier Zusatzwerkstoff erforderlich

Tabelle 11: Schweiß-eignung und Anwendung hochlegierter Kupferwerkstoffe

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit eingesetzt. Durch den Zusatz von Fe, das eine kornfeinende Wirkung hat, werden CuZn-Legierungen fester und weisen bessere Gleiteigenschaften auf. Bis zu einem Zn-Gehalt von ca. 37 % ist Messing einphasig mit kfz-Kristallgitterstruktur. Zwischen 37 und 46 % bildet sich eine spröde zweite Phase, die auf Grund ihrer krz-Struktur die Werkstofffestigkeit erhöht, die Zähigkeit jedoch senkt. Legierungen mit höheren Zn-Gehalten (> 46 %) bestehen aus der spröden β -Phase und sind ohne technische Bedeutung. [3], [79]

Homogene CuZn-Legierungen mit einer kfz-Kristallgitterstruktur sind ebenso wie unlegiertes Kupfer hervorragend kaltverformbar. Bei Warmumformung sollte ein Versprödungsbereich bei Temperaturen zwischen 400 und 520 °C beachtet werden. [3]

Heterogene Messinge sind auf Grund der krz-Phase deutlich fester aber auch korrosionsanfälliger und durch den höheren Zn-Gehalt schlechter wärmeleitfähig als homogene. Damit müssen diese Legierungen meist nicht vorgewärmt werden. Wenn ein Angriff durch Spannungsrissskorrosion zu erwarten ist, sollten heterogene Messinge bei Temperaturen zwischen 250 und 370 °C spannungsarm geglüht werden. [3], [79]

Das Schmelzschweißen der **Knetlegierungen** (besonders Schutzgas- sowie Strahlschweißen) bereitet insofern Schwierigkeiten, als durch den niedrigen Siedepunkt des Zn (906 °C) beim Schweißen Zn ausdampft. Dies kann zu porigen Schweißnähten und Heißrissen führen. Deshalb sinkt die Schweißleistung von CuZn-Legierungen mit steigendem Zn-Gehalt. Die Ausdampfung kann durch geringere Wärmeeinbringung und schnelles Schweißen [42] verringert werden. Bleihaltiges Messing ist grundsätzlich schlecht schweißgeeignet. Diese Legierungen sollten nicht geschweißt werden, da Pb einen niedrigen Schmelz- und Siedepunkt hat und bereits ein Gehalt von 0,03 % ebenfalls zur Bildung von Poren und Heißrissen führt [3]. Im Vergleich zu anderen Cu-Werkstoffen werden CuZn-Legierungen seltener durch Schmelzschweißen verbunden. Bevorzugt werden Lötverfahren.

Das Gasschweißen wird für CuZn-Legierungen vergleichsweise oft angewendet. Ein eingestellter Sauerstoffüberschuss der Flamme bewirkt, dass die abschmelzenden Tropfen des Schweißzusatzes und das Schweißbad mit einer dünnen Oxidhaut überzogen werden, die die Ausdampfung einschränkt. Der Sauerstoffüberschuss in der Schweißflamme sollte ca. 30 % betragen. An dieser Stelle ist der Einsatz von Flussmitteln zum Binden des Sauerstoffs notwendig. Ein Zusatz von Silikaten im Flussmittel ist vorteilhaft. Bei CuZn-Legierungen mit weiteren Legierungszusätzen (Mehrstoff-Legierung) beträgt der Sauerstoffüberschuss bis zu 50 %. Der Schweißzusatz CuZn40SnSiMn enthält 0,2 bis 0,4 % Si. Dieser Si-Zusatz fördert die Bildung einer der Zn-Ausdampfung entgegenwirkenden Oxidhaut auf den abschmelzenden Tropfen und dem Schweißbad. [79]

Das Lichtbogenhandschweißen ist für CuZn-Legierungen nur bedingt anwendbar. Beim WIG-Verfahren werden mit zinkhaltigen Zusatzwerkstoffen wie CuZn40SnSiMn Schweißnähte erzielt, die besonders bei Anwendung von Flussmitteln eine geringere Porenanfälligkeit aufweisen als gasgeschweißte Nähte. Als Schweißzusätze für die Schutzgasschweißverfahren werden aber in der Regel zinkfreie Legierungen wie CuSn1, CuSn6P, CuSi3Mn1 oder CuAl8 nach DIN EN 14640 bzw. ISO 24373 eingesetzt. Das eingesetzte Schutzgas sollte keinen Stickstoff enthalten [42].

Grundsätzlich kann ein Vorwärmen (bei < 20 % Zn empfohlen [42]) vorteilhaft sein, da hierdurch die Wärmeeinbringung beim Schweißen verringert wird, was der Zn-Ausdampfung entgegenwirkt. Auch ein Nachwärmen kann helfen, Spannungsrisse zu vermeiden [42]. Beim WIG-Schweißen mit Wechselstrom ist der Wärmeeintrag in den Werkstoff geringer als beim Schweißen mit Gleichstrom. Der Wechselstromlichtbogen bewirkt außerdem einen „Reinigungseffekt“ an der Metalloberfläche, was sich günstig auf die Nahtgüte (geringere Porigkeit) auswirkt [6]. MIG- und WIG-Impuls-Schweißen bieten sich ebenfalls zum Fügen von CuZn-Legierungen an. Bei diesem Verfahren kann die Wärmeein-

bringung und Wärmeführung in weiten Grenzen verändert und den Werkstoffeigenschaften optimal angepasst werden. Das WIG-Impuls-Verfahren wird besonders für das mechanisierte Schweißen eingesetzt.

Beim MIG- und MIG-Impuls-Verfahren werden meist zinkfreie Drahtelektroden wie CuSn6P oder CuSn1 eingesetzt. Die Anwendung von zinkhaltigen Zusatzwerkstoffen sollte auf solche Fälle beschränkt sein, wo dies zwingend notwendig ist, z. B. bei besonderen Anforderungen an das Beständigkeitsverhalten oder an die Farbgleichheit der Schweißverbindung. Aluminiumhaltige Legierungen werden vorzugsweise mit dem WIG-Verfahren geschweißt unter Verwendung der Zusatzwerkstoffe CuSn6P oder CuAl8 nach DIN EN 14640 bzw. ISO 24373. Es ist zu empfehlen, je nach Wanddicke auf 200 bis 300 °C vorzuwärmen. Bei Wanddicken größer 4 mm ist ein gleichzeitig-beidseitiges Schweißen zu empfehlen, weil hierbei eine bessere Nahtgüte vor allem hinsichtlich der Legierungseinheit erzielt wird [24]. Für die **Gusslegierungen** nach DIN EN 1982 ist zur Ausbesserung kleiner Fehlstellen an Gusstücken oder zum Schweißen von Armaturen das WIG-Verfahren mit den genannten Schweißzusätzen geeignet [22]. Von den Widerstandsschweißverfahren kommen für CuZn-Legierungen vor allem das Punkt- und Stumpfschweißen in Frage. Auf Grund des partiellen, oberflächlichen Anschmelzens von Messing und seiner Neigung zum Spritzen selbst bei der Herstellung einer Diffusionsverbindung im plastischen Zustand wird der Einsatz von Widerstandsschweißverfahren nicht empfohlen. Zusätzlich bereitet die starke Oxidation von Zn Schwierigkeiten. Die Festigkeit der Fügestellen weist in der Regel große Schwankungen auf. Strahlschweißverfahren sind auf Grund der Anfälligkeit für Poren durch Zn-Ausdampfung nur eingeschränkt nutzbar. Kaltpress-, Ultraschall-, Reib-, Reib- und Diffusionsschweißen sind dagegen gut einsetzbar, da sie unterhalb der Siedetemperatur von Zn arbeiten.

5.3.3 Kupfer-Zinn-Legierungen (Zinnbronze)

CuSn-Knetlegierungen enthalten als Hauptlegierungszusatz bis zu 8,5 % Sn und sind einphasig mit kfz-Gitter. Sie sind auf Grund des elastischen Verformungsvermögens des Sn u. a. ausgezeichnete Lager- und Federwerkstoffe für den Maschinenbau bzw. die Elektrotechnik.

Die Zugabe weiterer Elemente beeinflusst z. B. die Breite des Erstarrungsintervalls, die Phasengrenze und die elektrische und thermische Leitfähigkeit. Durch Zn werden das Erstarrungsintervall eingeengt, Festigkeit und Warmformbarkeit in geringem Maße verbessert sowie die Leitfähigkeit etwas gesenkt. Zn wirkt neben P außerdem als Desoxidationsmittel. P wird zu maximal 0,4 % den Legierungen beigemischt. Es verbessert zudem allgemein die Gießbarkeit sowie die Gleiteigenschaften bei CuSn8, erweitert hingegen das Erstarrungsintervall und senkt neben der Leitfähigkeit auch die Warmformbarkeit. Dies gilt ebenso für Pb, das zur Verbesserung der Zerspanbarkeit als auch der Gleiteigenschaften, insbesondere bei Gusswerkstoffen, eingesetzt wird. Ni bewirkt eine Steigerung der Schmelztemperatur und verringert die Festigkeit. Es verringert außerdem die Leitfähigkeitswerte und verschiebt die Phasengrenze zu niedrigeren Sn-Gehalten.

Auf Grund ihres großen Erstarrungsintervalls neigen CuSn-Legierungen zu Heißbrissen und zu Kristallseigerung. Die größte Heißbrissanfälligkeit ist bei 2 % Sn zu beobachten. Heterogene CuSn-Legierungen sind demnach weniger heißbrissanfällig als homogene. Beim Abkühlen bilden sich erst sehr kupferreiche Mischkristalle, so dass ein dünner Film zinnreicher Schmelze an den Korngrenzen verbleibt und zu spröden β -Mischkristallen kristallisiert. Aus den β -Mischkristallen werden dann intermetallische Phasen, die zu einer starken Abnahme der Kaltverformbarkeit führen. Diffusionsvorgänge im Cu-Sn-System laufen sehr träge ab, so dass die Zustandsschaubilder nicht die realen Verhältnisse widerspiegeln [79].

Im Temperaturbereich von 400 bis 650 °C unterliegen einphasige CuSn-Legierungen einem starken Verfor-

mungsabfall, hinter dem Verunreinigungen an den Korngrenzen vermutet werden. Bei einer Warmumformung in diesem Bereich kann es allein auf Grund vorhandener Eigenspannungen durch plastische Verformung zu Rissen im Schweißgut und in der Wärmeeinflusszone kommen. Dieser Effekt kann durch entsprechendes Vorwärmen minimiert werden, da so der Aufbau von zu hohen Schrumpfspannungen verhindert wird [79].

Das Schmelzschweißen der CuSn-Knetlegierungen ist insbesondere im chemischen Apparatebau von Bedeutung. Infolge des hohen Siedepunktes von Sn (etwa 2270 °C) ist eine Sn-Ausdampfung nicht zu befürchten. Es können jedoch Seigerungen auftreten. Legierungen mit höheren Gehalten an Pb gelten als nicht schmelzschweißbar. Das Gasschweißen hat für CuSn-Legierungen kaum noch Bedeutung. Es ist mit artgleichen Schweißzusätzen, z. B. mit CuSn6P oder CuSn12P, und Flussmitteln durchführbar. Um Eindringen von Wasserstoff und damit Porenbildung in der Schweißnaht zu verhindern, ist die Flamme leicht oxidierend einzustellen. Nach dem Schweißen kann die Naht zur Beseitigung von Spannungsspitzen bei Raumtemperatur gehämmert werden.

Das Lichtbogenhandschweißen hat ebenfalls nur noch untergeordnete Bedeutung. CuSn-Legierungen werden vorzugsweise mit dem WIG- oder MIG-Verfahren geschweißt. Wegen der niedrigen Wärmeleitfähigkeit ist ein Vorwärmen auch bei Wanddicken bis ca. 12 mm nicht erforderlich, wird aber empfohlen (150 ... 200 °C) [3].

Nach dem WIG-Verfahren hergestellte Schweißnähte haben eine geringe Porenanfälligkeit. Die Festigkeitseigenschaften der Schweißverbindungen genügen den Anforderungen nach dem Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter (AD) Regelwerk. Für Bleche mit ca. 5 bis 12 mm Wandstärke ist das gleichzeitig-beidseitige Schweißen zu empfehlen. Für die im Apparatebau verwendete Legierung CuSn6 (DIN CEN/ TS 13388) findet der Schweißzusatz CuSn6P mit $P \leq 0,01$ % Anwendung, der die porenfreie Ausbildung der Schweißnaht garantiert.

Das MIG-Verfahren kommt unter Verwendung von CuSn6P oder CuSn12P für

Legierungen vorzugsweise bei großen Nahtquerschnitten und Blechdicken sowohl für Stumpfnähte als auch für Kehlnähte zum Einsatz.

Zum Schmelzschweißen von **CuSn-Gusslegierungen**, z. B. von Formgussstücken in Kunstgießereien, haben sich sowohl das WIG- als auch das MIG-Verfahren mit CuSn6P und CuSn12P als Schweißzusätze bewährt [22], [25]. Das Widerstandsschweißen lässt sich auf Grund der geringen Wärmeleitfähigkeit an CuSn-Legierungen gut durchführen. Eine zu hohe Wärmeeinbringung muss jedoch durch die Einhaltung bestimmter geometrischer Verhältnisse zwischen den Fügepartnern vermieden werden, da sie zur Anreicherung von Sn an den Korngrenzen führt und somit Heißbrissbildung hervorruft.

Auch das Reib- und Rührreibschweißen sowie Ultraschall-, Kaltpress- und Diffusionsschweißen können gut angewendet werden.

5.3.4 Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierungen (Rotguss)

Die CuSnZn-Gusslegierungen enthalten Sn und Zn als Hauptlegierungselemente und zum Teil auch Pb. Zu ihren Anwendungsgebieten gehören das Bauwesen, Armaturen für den Apparatebau sowie Gleitlager für den Maschinenbau. Als Gusswerkstoffe werden sie seltener geschweißt.

Die bleihaltigen Legierungen gelten als nicht schmelzschweißbar (inklusive Strahlschweißen). Für die Legierungen ohne oder mit geringen Pb-Gehalten ($\leq 1,5$ % Pb) hat sich aber sowohl das WIG- als auch das MIG-Verfahren als geeignet erwiesen. Als Schweißzusätze werden je nach Legierungszusammensetzung CuSn6P und CuSn12P eingesetzt.

Widerstandsschweißen kommt für diese Gusswerkstoffe kaum zur Anwendung.

Ultraschall-, Kaltpress- und Diffusionsschweißen können ebenso wie Reib- und Rührreibschweißen gut angewendet werden.

5.3.5 Kupfer-Blei-Zinn-Gusslegierungen

Die CuSnPb-Gusslegierungen werden vorwiegend als Lagerwerkstoffe eingesetzt und enthalten außer Sn auch

höhere Gehalte an Pb, deshalb sind sie nicht schmelzschweißbar (inklusive Strahlschweißen).

Widerstandsschweißen kommt für diese Gusswerkstoffe ebenfalls nicht in Betracht.

Ultraschall-, Kaltpress- und Diffusionsschweißen könnten ebenso wie Reib- und Rührreißschweißen eingesetzt werden, es liegen aber noch keine Erfahrungen vor.

5.3.6 Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber)

Die CuNiZn-Legierungen enthalten als Hauptlegierungszusätze Ni und Zn. Bleihaltige Legierungen enthalten zur Verbesserung der Zerspanbarkeit bis zu 4 % Pb. Die Schmelzschweißbeignung wird hierdurch erheblich beeinträchtigt.

Das Gasschweißen führt bei bleifreien Legierungen zu Verbindungen mit guter Nahtqualität. Zur Einschränkung der Zn-Ausdampfung ist das Nachlinks-Schweißen anzuwenden und die Schweißflamme leicht oxidierend einzustellen. Der Ni-Gehalt verringert die Zn-Ausdampfung. Die leicht oxidierende Flamme fördert jedoch die Bildung von Ni-Oxiden. Es sind daher Flussmittel erforderlich.

Das WIG-Verfahren ist wie bei Messing (siehe Kap. 5.3.2.) anwendbar und führt zu guten Ergebnissen. Das MIG-Schweißen ist auf Grund der hohen Wärmeeinbringung nur eingeschränkt einsetzbar, da die Neusilberlegierungen leicht überhitzbar sind und an den zu schweißenden Teilen Wärmestau zu vermeiden ist. Da mit dem MIG-Verfahren wegen der Überhitzbarkeit nicht mit artgleichem Zusatzwerkstoff geschweißt werden kann, ist es bei Anforderungen an die Farbgleichheit nicht anwendbar. N als Schutzgasbestandteil ist für Neusilberlegierungen nicht geeignet [42].

Für das Widerstandsschweißen sind die bleifreien Legierungen besser geeignet als die bleihaltigen.

Zur Vermeidung von Überhitzung sind die Verfahren, mit denen die Verbindung im festen Zustand erzeugt wird, gut geeignet. Das betrifft das Reib- und Rührreißschweißen ebenso wie das Ultraschall-, Diffusions- und Kaltpressschweißen.

5.3.7 Kupfer-Nickel-Legierungen

In den CuNi-Legierungen ist Ni der Hauptlegierungszusatz. Beide Elemente bilden eine lückenlose Mischkristallreihe, so dass alle Legierungen einphasig sind. Meist enthalten die Legierungen zusätzlich Mn und Fe zur Verbesserung der Beständigkeit in Meerwasser.

Mn wird zu maximal 2 % den Legierungen zugesetzt und wirkt als Desoxidationsmittel und Binder für Schwefel. Es verbessert zudem sowohl die Gieß-eigenschaften als auch die Festigkeit und die Entfestigungstemperatur. Sn verbessert die mechanischen Eigenschaften und das Anlaufverhalten. Fe, mit maximal 3 % in CuNi-Legierungen enthalten, bewirkt auf Grund seiner begrenzten Löslichkeit die Aushärtbarkeit bei höheren Fe-Gehalten und erhöht neben der Korrosions- und Erosionsbeständigkeit auch die Rekristallisationstemperatur sowie die Temperatur der magnetischen Umwandlung. CuNi-Legierungen können in Abhängigkeit der Temperatur und des Ni-Gehaltes sowohl para- als auch ferromagnetisch sein. Als Werkstoffe mit hohem elektrischen Widerstand, guter Verformbarkeit und Tieftemperaturzähigkeit sowie ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit [3], z. B. gegenüber Meerwasser, finden sie als Widerstandswerkstoffe in der Elektrotechnik und im Schiffbau Verwendung.

Allgemein gelten CuNi-Legierungen als gut schweißbar [3], [22], [26], [27]. Auf Grund ihrer niedrigen elektrischen Leitfähigkeit müssen sie nicht vorgewärmt werden. Es sind alle gebräuchlichen Schmelzschweißverfahren anwendbar. Die Halbzeuge sollten möglichst im weichgeglühten Zustand vorliegen. Auf Grund des Anteils an hochreaktivem Ni neigen CuNi-Legierungen generell zur Porenbildung, da sie mit zunehmender Temperatur und steigendem Ni-Gehalt mehr H lösen können. Außerdem sind sie sehr empfindlich gegen niedrigschmelzende, unlösliche Phasen, die sich an den Korngrenzen ablagern und zu Heißrisen führen können. Kritische Elemente sind z. B. Ag, B, P, Pb, Sn, Zn und ganz besonders S (Ni-NiS-Eutektikum, Schmelztemperatur: 650 °C) [3]. Deshalb sollte auf geeignete Schweißzusätze geachtet werden. Beim Schmelz-

schweißen von Legierungen mit höheren Ni-Gehalten ist zu beachten, dass die Verwendung ungeeigneter Schweißzusätze bei höheren Temperaturen im Schweißbad die Bildung zähflüssiger Schlacken aus Ni-Oxiden und Oxidgemischen zur Folge haben kann, die den Schweißablauf beeinflussen.

Um die genannten Problem zu vermeiden, sollten die Fügeteile und die Zusatzwerkstoff gut gesäubert werden. Es ist empfehlenswert, vorhandene Schichten wie Walzhäute und Oxidschichten durch Ätzen oder Schleifen vor dem Schweißen zu beseitigen. [3] Beim Gasschweißen, das bei CuNi-Legierungen nur noch in sehr geringem Umfang angewendet wird, ist die Flamme auf einen geringen Acetylenüberschuss einzustellen. Ferner sind Flussmittel zu verwenden, die Gasaufnahme und Oxidbildung verhindern. Der Grundwerkstoff sollte so wenig wie möglich aufgeschmolzen und schnell – möglichst ohne Absetzen – geschweißt werden. Als Schweißzusatz dient CuNi30 nach DIN EN 14640 bzw. ISO 24373.

Das Lichtbogenhandschweißen ist bei CuNi-Legierungen mit umhüllten Stabelektroden durchführbar, wird aber nur noch in geringem Umfang angewendet. In der Regel wird artgleich geschweißt. Für das Verschweißen von CuNi10Fe1Mn mit CuNi30Mn1Fe hat sich der Zusatzwerkstoff NiCu30Mn3Ti nach DIN EN ISO 14172 bewährt.

Das WIG-Verfahren wird bei CuNi-Legierungen vorrangig angewendet. Es werden in der Regel die Zusatzwerkstoffe CuNi10 und CuNi30 eingesetzt. Hiermit werden porenarme Schweißverbindungen mit guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften erzielt. Das gleichzeitig-beidseitige WIG-Schweißen hat sich gut bewährt und wird bei Wanddicken ab ca. 12 mm in Kombination mit dem MIG-Verfahren angewendet.

Mit dem MIG-Schweißen – insbesondere unter Berücksichtigung der Impulstechnik – sind bei Verwendung der Drahtelektrode CuNi30 gute Schweißergebnisse erzielbar. Gussstücke aus CuNi-Legierungen lassen sich mit dem WIG- und MIG-Verfahren mit CuNi30 nach DIN EN 14640 bzw. ISO 24373 schweißen [50]. Auf

diese Weise werden Gussbauteile, wie z. B. Pumpen und Ventilkörper, mit Rohrstutzen und Flanschen verbunden. Zur Verbesserung der Schweißbeignung enthalten CuNi-Gusslegierungen Zusätze von Si und Nb.

Für CuNi10Fe1Mn1-C ist die Schweißbeignung gewährleistet, wenn das Verhältnis Nb:Si im Grundwerkstoff der Gleichung $Nb \gg (1,55 \% \cdot \% Si) - 0,1$ genügt. Zur besseren Schweißbeignung von CuNi30Fe1Mn1-C wird empfohlen, 0,4 % Si mit 0,8 % Nb zu kombinieren [50].

Wegen ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit lassen sich CuNi-Legierungen sehr gut Widerstandsschweißen. Sie sind dadurch aber auch empfindlich gegen Überhitzung. Das Widerstandsschweißen kommt z. B. zum Verbinden sehr dünner Drähte sowie beim Zusammenbau elektrischer Instrumente in Frage. CuNi-Knetlegierungen können durch den mangelnden Reinheitsgrad und falsche Wärmebehandlung, häufig rissanfällig sein. Das ferromagnetische Verhalten ist die Ursache für die Lichtbogenablenkung beim Schweißen, wodurch eine einwandfreie Schweißausführung beeinträchtigt wird. Es hat sich bei der Legierung CuNi10Fe1Mn gezeigt, dass eine hohe Permeabilität sowohl auf einen großen Anteil an NiFe-reichen Ausscheidungen als auch auf erhöhte Heißrissanfälligkeit hin-



Abbildung 19: Schwenklager aus 6 mm dickem CuAl11Fe6Ni6-C-GM, unter Ar WIG-geschweißt mit Zusatzwerkstoff CuAl8 [83]

weist. Zum Nachweis der Schweißbeignung von CuNi10Fe1Mn erweist sich daher die Permeabilitätsmessung als eine aussagefähige und wenig aufwendige Prüfmethode [28]. Bei dieser Legierung verhält sich die Schweißnaht in elektronenstrahlgeschweißten Verbindungen bezüglich ihrer Festigkeitseigenschaften bei erhöhten Temperaturen weitgehend wie der Grundwerkstoff [20].

5.3.8 Kupfer-Aluminium-Legierungen

CuAl-Legierungen enthalten Al als Hauptlegierungszusatz (Zweistofflegierungen) und oft noch weitere Legierungselemente, wie Fe, Ni, Sn und Mn (Mehrstofflegierungen), vor Allem zur Verbesserung von Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Zweistofflegierungen sind im Allgemeinen besser schweißgeeignet als Mehrstofflegierungen.

Auf Grund ihrer Beständigkeit gegenüber vielen Medien, die auf die spontane Bildung einer Al-Oxidschicht zurückzuführen ist, finden sie Anwendung im chemischen Apparatebau. Ferner werden sie im Maschinenbau als hoch belastbare Gleitwerkstoffe verwendet.

CuAl-Knetlegierungen sind bis etwa 7,5 % Al einphasig und bis rund 14 % Al zweiphasig. Homogene Legierungen sind gut kalt- und mäßig warmumformbar sowie umwandlungsfrei. [3], [79]

Die heterogenen CuAl-Legierungen sind im Gegensatz zu den homogenen sehr gut warmumformbar und auf Grund der spröderen β -Phase fester und durch den höheren Al-Anteil besser schweißgeeignet. Werden diese Legierungen abgeschreckt, zeigen sie ähnlich wie bei der Martensitbildung ein nadelige, harte α' -Phase [3], [79]. CuAl-Legierungen lassen sich relativ gut durch Schmelzschweißen verbinden [22], [29]. Das zum Einsatz kommende Schweißverfahren muss in der Lage sein, die sich beim Schweißen verstärkt bildenden hochschmelzenden Al-Oxide zu entfernen. Vorwärmen der zu schweißenden Teile ist im Allgemeinen nicht erforderlich [30].

Das Gasschweißen wird nur selten angewendet, obwohl es mit Hilfe wirksamer Flussmittel eingesetzt wer-

den kann. Wenn gasgeschweißt werden muss, wird hauptsächlich CuAl8 als Zusatzwerkstoff verwendet. Es muss mit neutraler Flammeneinstellung geschweißt werden, um eine Neuoxidation gering zu halten und eine verstärkte Wasserstoff-Aufnahme zu unterbinden. Das Gasschweißen erfordert im Wesentlichen aus Fluoriden bestehende Sonderflusmittel, um die sich bildenden hochschmelzenden Al-Oxidhäute (ca. 2000 °C) rasch und vollständig aufzulösen [80]. Das Entfernen der Oxide ist ausschlaggebend für die schweißtechnische Verarbeitung der CuAl-Legierungen und die Güte der Schweißverbindungen. Diese Flussmittel lösen bei den hohen Arbeitstemperaturen außer dem Al-Oxid auch Oxide, die sich aus anderen Legierungsbestandteilen bilden. Das Flussmittel muss nach dem Schweißen wieder entfernt werden [3]. Eine weitere Nachbehandlung der Schweißnaht durch Warm- oder Kalthämmern ist nicht erforderlich.

Für die Durchführung des Lichtbogenhandschweißens stehen umhüllte, nicht mehr genormte Stabelektroden zur Verfügung, mit denen sowohl Verbindungs-schweißungen an CuAl-Legierungen als auch Auftragschweißungen auf ferritisch-perlitische Stähle ausgeführt werden können. Abgesehen von Instandsetzungsschweißungen und Auftragschweißungen auf Stahl hat das Lichtbogenhandschweißen für CuAl-Legierungen eine untergeordnete Bedeutung. Für die Schweißausführung sind die Angaben und Vorschriften des Elektrodenherstellers genau zu beachten.

Wie bei anderen Kupferlegierungen werden vorrangig WIG- und MIG-Schweißen zum Fügen von CuAl-Legierungen eingesetzt.

Das WIG-Verfahren wird sowohl mit Hochfrequenz überlagertem Wechselstrom ohne Flussmittel („Reinigungseffekt“ des Lichtbogens, siehe Kap. 4.1) als auch mit Gleichstrom, Elektrode am Minuspol, unter Verwendung von Flussmittel zur Lösung der hochschmelzenden Al-Oxidhaut eingesetzt. Beim letztgenannten Verfahren bietet sich zum Schweißen von Stumpfnähten im Wanddickenbereich von 4 bis 10 mm das gleichzeitig-beidseitige Schweißen an. Diese Methode hat sich

bestens bewährt. Der Bauteilverzug ist gering, und es werden nahezu porenfreie Nähte mit sehr guten mechanisch-technologischen Eigenschaften erzielt. Das Flussmittel muss nach dem Schweißen jedoch sorgfältig entfernt werden [3].

Das MIG-Schweißen wird vorzugsweise bei größeren Blechdicken und zum Schweißen von Kehl- und Ecknähten mit positiv gepolter Drahtelektrode [3] angewendet. Vorwärmen ist selbst bei größeren Wanddicken nicht erforderlich. Bei Stumpfnähten ist die wirtschaftliche Anwendung schon bei Wanddicken ab ca. 6 mm gegeben. Das MIG-Impulsschweißen ist ebenfalls gut anwendbar.

Beim Schutzgasschweißen von einphasigen CuAl-Legierungen werden bei Verwendung von artgleichen Zusatzwerkstoffen bzw. beim Schweißen ohne Zusatzwerkstoff Heißrisse in der Naht beobachtet. Diese Erscheinung ist damit zu erklären, dass einphasige und schwach zweiphasige Legierungen beim Schweißen zu deutlich ausgeprägtem Grobkorn in der Naht neigen. Dieses Kornwachstum ist besonders bei Legierungen mit einem Al-Gehalt < 7 % deutlich vorhanden und wird begleitet von Korngrenzenausscheidungen in Form von aluminiumreichen Korngrenzenfilmen, welche bei Temperaturen oberhalb 500 °C ein ausgeprägt sprödes Verhalten zeigen [31], was schließlich zu Heißrissigkeit führt. Dieser Heißrissigkeit kann u. a. durch legierungstechnische Maßnahmen bei den Zusatzwerkstoffen entgegengewirkt werden, z. B. durch Anhebung des Al-Gehaltes und Zulegierung von Ni und Fe [31]. Gleichzeitig sollte darauf geachtet werden, dass nur wenig Wärme durch schnelles Schweißen ohne Pendeln eingebracht wird und nur kleine Schweißbäder erzeugt werden. Im Übrigen sollten die zu schweißenden Halbzeuge im weichgeglühten Zustand vorliegen, um einen deutlich ausgeprägten unsteten Korngrößen- und Härteverlauf im Nahtbereich entgegenzuwirken. Hierdurch wird gleichzeitig bei einphasigen Legierungen mit Al-Gehalten < 7,5 % die Heißrissneigung in der Wärmeeinflusszone vermindert.

Es ist auch bei sorgfältiger Schweißausführung nicht völlig auszuschlie-

ßen, dass an Schweißverbindungen aus vorzugsweise einphasigen Legierungen (z. B. CuAl5As) Heißrisse vereinzelt in der Wärmeeinflusszone oder Nahtübergangszone auftreten können. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, diese Schweißverbindungen stichprobenweise zerstörungsfrei mit Durchstrahlungs- oder Oberflächenrisprüfung zu prüfen.

Bei Beachtung der vorgenannten Empfehlungen sind einwandfreie Schweißverbindungen erzielbar, welche den Anforderungen im Druckbehälterbau genügen.

Für **Gusslegierungen** nach DIN CEN/TS 13388, z. B. Reparaturschweißungen oder zur Ausbesserung von Gussfehlern, ist das WIG- und MIG-Verfahren unter Verwendung von solchen Zusatzwerkstoffen nach DIN EN 14640 bzw. ISO 24373, die in ihrer chemischen Zusammensetzung den Grundwerkstoffen ähnlich sind, zu empfehlen [25], [32]. Widerstandsschweißungen an CuAl-Legierungen sind im Allgemeinen gut durchführbar.

6. Thermisches Fügen von Kupfer mit anderen metallischen Werkstoffen und Schweißen von kupferplattierten Stahlblechen

Prinzipiell ist das Herstellen von Mischverbindungen mit jedem Schweißverfahren möglich. Einschränkungen ergeben sich aus metallurgischer Sicht durch die in der Fügezone entstehenden Phasen der Werkstoffpaarung. Durch das Schmelzen der Werkstoffe werden unabhängig vom eingesetzten Verfahren häufig spröde intermetallische Phasen gebildet, die Risse in der Verbindungszone verursachen können. Durch die Wahl des Schweißprozesses kann lediglich die Größe dieser Phasen beeinflusst werden. Unproblematisch sind Verbindungen mit vollständiger Löslichkeit beider Komponenten (z. B. Cu und Ni). Bei vollständiger Unlöslichkeit können Schweißzusätze bzw. Zwischenschichten, die mit beiden Komponenten Mischkristalle bilden, eingesetzt werden. Auch große Unterschiede in der Dichte und den Schmelzpunkten bzw. -intervallen können Schwierigkeiten bereiten. Durch den Einsatz von Pressschweißverfahren, die eine Verbindung im festen Zustand erzeugen, werden diese Probleme vermieden. Deshalb können mit diesen Prozessen alle Metalle und Legierungen gefügt werden. [4]

Im Apparate- und Druckbehälterbau werden Kupfer und Kupferlegierungen untereinander, mit anderen NE-Metallen und mit Fe-Werkstoffen häufig schmelzgeschweißt.

Beim Schweißen von Kupfer mit Kupferlegierungen sind bei der Verbindung die Unterschiede in Festigkeitseigenschaften bei erhöhten Temperaturen und in den physikalischen Eigenschaften (Wärmeleitfähigkeit und -ausdehnung, Schmelzwärme und -temperatur) zu berücksichtigen. Empfehlungen für einige technisch bedeutsame Werkstoffkombinationen enthält Tab. 12.

Die gleichzeitig-beidseitige WIG-Schweißung hat sich hierbei für einige Werkstoffkombinationen gut bewährt. Bei Verbindungen, wo schlecht leitende und gut leitende Werkstoffe miteinander zu schweißen sind, ist der gut leitende Werkstoff (z.B. Cu) vorzuwärmen. Beim Fügen muss der Lichtbogen so geführt werden, dass der schlechter leitende Werkstoff (beispielsweise CuNi-Legierung) nicht überhitzt wird. Bei der Verbindung von

Kupfer mit Ni und Ni-Legierungen sollte die Kupfer-Seite vorab mit einem Zusatzwerkstoff auf Ni-Basis gepuffert werden, welcher auch mit dem Ni-Basis-Schweißzusatz metallurgisch verträglich für die Fügeverbindung ist.

Für das WIG-Schweißen von Kupfer mit Ni eignet sich z. B. der Schweißzusatz NiTi3 nach DIN EN ISO 14172 sowohl für das Herstellen der Pufferschicht auf Kupfer als auch für die anschließende Fügeverbindung. Für das WIG-Schweißen von Kupfer mit Nickelbasislegierungen eignet sich ebenfalls der Schweißzusatz NiCu30Mn3Ti (DIN EN ISO 14172).

Mit dem Elektronenstrahlschweißverfahren lassen sich Verbindungen von Kupfer mit Kupferlegierungen (Ausnahme: zinkhaltige Legierungen wegen Ausdampfung) und Cu und Cu-Legierungen mit Ni und Ni-Legierungen, mit Co-Legierungen (Ausnahme: Hartstoffe mit hohem Carbidgehalt) und mit hochlegierten Stählen mit sehr niedrigem C-Gehalt herstellen [14].

Beim Fügen von Kupfer mit Fe-Werkstoffen besteht die Gefahr der Loteindringung in Stahl („Lotrissigkeit“). Darunter ist das Eindringen z.B. von Cu-Werkstoffen im flüssigen Zustand entlang der Korngrenzen des Stahles zu verstehen [33], [34], [35]. Diese Erscheinung tritt auf, wenn Stahl mit hochkupferhaltigen Zusätzen (> 50% Cu) unmittelbar gefügt wird. Die mit Kupfer angereicherten Korngrenzen des Stahls stellen Schwachstellen im Gefügeverbund dar. In vielen Fällen ist die Loteindringung zusätzlich mit Korngrenzenaufbrüchen im Stahl gekoppelt. Austenitische Stähle gelten als hochgradig anfällig für Loteindringung. Bei diesen Verbindungen müssen geeignete Maßnahmen zur Verhinderung oder Verminderung von Loteindringung getroffen werden. Das kann beispielsweise durch Fügen mit niedriger Streckenenergie und geringem Aufmischungsgrad erreicht werden. Mit dem MIG-Impulslichtbogenschweißen ist es gelungen, an Verbindungen aus E355 und CuAl10Ni5Fe4 Wärmeeinbringung und Vermischungsgrad sowie Loteindringtiefe so niedrig zu halten, dass die sicherheitstechnischen Anforderungen

der Technischen Überwachungs-Organisation (TÜO) erfüllt werden konnten [32]. Als Zusatzwerkstoff wurde CuAl8Ni2 (DIN EN 14640 bzw. ISO 24373) eingesetzt.

Mit den genannten Verfahren lassen sich auch verschleißfeste Auftragungen aus Kupferlegierungen (CuSn- und CuAl-Legierungen) auf C-Stahl aufbringen [37]. Bei der Verkleidung von Schiffskörpern mit Blechen aus CuNi-Legierungen muss das Fügen der Verkleidungsbleche mit Stahl vorzugsweise in Zwangslagen erfolgen. Auch hier bietet sich das MIG-Impulslichtbogenschweißen mit dem Zusatzwerkstoff ERNiCu7 (ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section II, Part C, SFA-5.14, Edition 1986) als wirtschaftliches und technisch gut geeignetes Verfahren an [38].

Vergleichbar gute Ergebnisse werden auch bei MIG-Impulsschweißungen an Baustahl mit dem Zusatzwerkstoff CuSn1 erzielt. Empfehlungen für das Fügen von Cu-Werkstoffen mit Stahl enthält Tab. 13 und Abb. 20. Grundsätzlich sollten anhand von Versuchen die optimalen Fertigungsbedingungen für eine Fügeaufgabe ermittelt werden. Beim Verbinden kupferplattierter Stahlbleche richten sich Nahtvorbereitung und Schweißfolge in der Regel nach den Angaben in DIN EN ISO 9692-4 und DIN EN 1011-5.

Die plattierungsseitige Grundlageschweißung mit Zusätzen aus Kupferwerkstoffen sollte mit niedriger Streckenenergie ausgeführt werden, um den Aufmischungsgrad und die Loteindringung im Stahl so niedrig wie möglich zu halten. Die Güte von Verbindungen an Cu-plattierten Stahlblechen ist unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass die Loteindringung im Stahl niedriger als 0,5 mm und der Fe-Gehalt in der Plattierungsdecklage geringer als 0,5 % ist [46].

Bei Verbindungen und Auftragschweißungen mit geringer, untergeordneter mechanischer Beanspruchung führt Loteindringung in Stahl erfahrungsgemäß nicht zwangsläufig zum Versagen des Bauteils. Bei höher beanspruchten Fügeverbindungen und besonders bei dynamischer Belastung, muss die Loteindringung auf ein unkritisches Maß beschränkt bleiben, was durch geeignete Prüfungen und Gefügeun-

Werkstoff 1	Werkstoff 2	Schweißverfahren	Zusatzwerkstoff	Bemerkungen
Kupfer	CuSi2Mn, CuSi3Mn	WIG, MIG	CuSn6P	ab > 10 mm Blechdicke Cu-Seite vorwärmen (300 ... 400 °C)
Kupfer	CuZn-Legierung	WIG	CuSn6P oder CuSn1	je nach Wanddicke Cu-Seite vorwärmen (200 ... 500 °C)
Kupfer	CuSn-Legierung	WIG, MIG	CuSn6P	
Kupfer	CuNi-Legierung	WIG, MIG	CuNi30Fe1Mn	
Kupfer	CuAl-Legierung	WIG, MIG	CuAl8Ni2 oder CuSn6P	

Tabelle 12: Thermisches Fügen von Cu mit Cu-Legierungen [46]

tersuchungen nachzuweisen ist. Für die Herstellung von Verbindungen an plattierten Stahlblechen mit Auflagerwerkstoff aus CuNi10Fe1Mn kann plattierungsseitig zunächst eine Pufferlage aus Ni oder einer NiCu-Legierung aufgebracht werden. Es ist darauf zu achten, dass die Fe-Aufmischung in der Plattierungsdecklage aus Gründen des Beständigkeitsverhaltens in Meerwasser 5 % nicht übersteigt [39], [40].

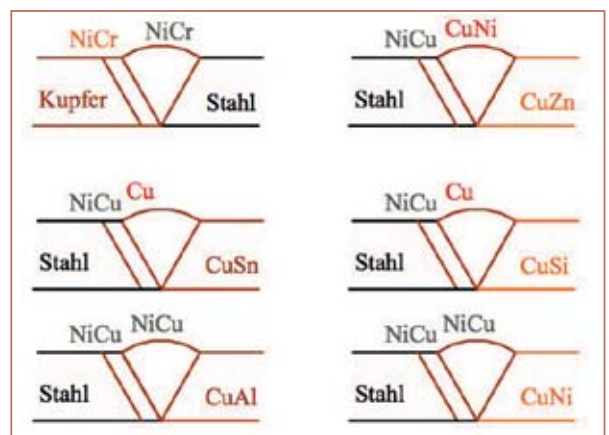


Abbildung 20: Thermisches Fügen von Mischverbindungen mit Stahl

Werkstoff 1	Werkstoff 2	Beanspruchung	Schweißverfahren	Schweißzusatz	Bemerkung
Kupfer	unleg. Stahl	untergeordnet	WIG, MIG- bzw. MIG-Impulslichtbogen Lichtbogenhand	CuSn6P, CuAl8, NiCu30MnTi, NiCu30Mn3Ti (E)	Cu-Seite auf ca. 200 ... 500 °C vorwärmen
Kupfer	unleg. oder austenit. Stahl	hoch	WIG, MIG- bzw. MIG-Impulslichtbogen Lichtbogenhand	NiTi4, NiTi3 (E), NiCr20Nb, NiCr16FeMn (E)	Cu-Seite mit WIG und NiTi4 oder NiCr20 puffern, auf ca. 200 ... 300 °C vorwärmen; ohne Vorwärmen Verbindungsschweißen mit NiCr20Nb oder NiCr16FeMn (E)
CuMn2	unleg. Stahl	-	WIG, MIG- bzw. MIG-Impulslichtbogen	CuSn6P, CuAl8, CuAl8Ni2	Stahlseite mit MIG-Impulslichtbogen und CuSn- oder CuAl-Zusatz puffern; Verbindungsschweißen mit CuSn- oder CuAl-Zusatz
CuZn-Legierungen	unleg. Stahl	-	WIG	CuSn6P, CuAl8	Stahlseite mit MIG-Impulslichtbogen und CuSn- oder CuAl-Zusatz puffern; Verbindungsschweißen mit CuSn- oder CuAl-Zusatz
CuSn-Legierungen	unleg. Stahl	-	WIG, MIG- bzw. MIG-Impulslichtbogen	CuSn1, CuSn6P	Stahlseite mit MIG-Impulslichtbogen und CuSn6P puffern; Verbindungsschweißen mit CuSn6P oder CuSn1
CuNi-Legierungen	unleg. Stahl	-	Lichtbogenhand WIG, MIG- bzw. MIG-Impulslichtbogen	NiCu30Mn3Ti (E), NiCu30MnTi	Stahlseite bei Lichtbogenhand-schweißen und WIG mit NiCu-Zusatz puffern
CuAl-Legierungen	unleg. Stahl	-	WIG, MIG- bzw. MIG-Impulslichtbogen	CuAl8, CuAl8Ni2	Stahlseite MIG-Impulslichtbogen mit CuAl-Zusatz puffern

Tabelle 13: Hinweise zu Schweißverfahren und Zusatzwerkstoffen beim Fügen von Mischverbindungen [16]

7. Schweißsicherheit

7.1 Schweißnahtvorbereitung

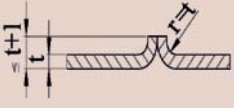
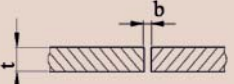

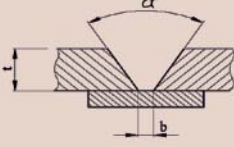
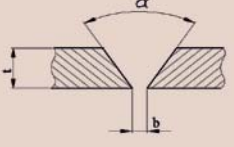
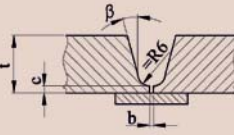
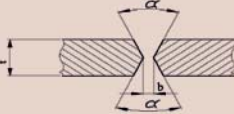
Die Schweißbarkeit eines Bauteils wird neben dem Werkstoff und dem Schweißverfahren durch die Konstruktion beeinflusst. Durch den Konstrukteur müssen die Bauteilabmaße, die Stoßart sowie die Fugenform unter Berücksichtigung von verfahrens- und werkstofftechnischen Randbedingungen festgelegt werden. Bei der Vorbereitung der Bauteile für die Schweißverbindung ist zwischen Stumpf- und Kehl- sowie sonstigen Nähten zu unterscheiden. Kehl- und Überlappnähte sind für Lichtbogenschweißungen gut, für Gasschweißungen dagegen nur bedingt geeignet. Stumpfstöße können u. a. als I-, V- und X-Fuge ausgeführt werden. Die für Kupfer und Kupferlegierungen einsetzbaren Fugenformen für das Gas-, WIG- und

MIG-Schweißen nach DIN 8552-3 und für Plasma-, Laser- und Elektronenstrahlschweißen sind in Tab. 14 a-c aufgeführt. Bei Verfahren, bei denen kein Zusatzwerkstoff verwendet wird, ist der Stoß als I-Naht auszuführen. Zur Gewährleistung einer kostengünstigen und haltbaren Konstruktion sollten die Spannungszustände der geschweißten Bauteile so niedrig wie möglich gehalten werden. Dies lässt sich z. B. durch eine geeignete Anordnung der Schweißnähte oder durch Vorwärmen (geringerer Temperaturgradient) realisieren. Hier gelten die allgemein bekannten Regeln zur Schweißspannungsminimierung. Bei der Gefahr von hohen Spannungen innerhalb der Schweißkonstruktion sind entsprechende Vor- und/ oder Nachbehandlungsverfahren vorzusehen.

Außerdem muss der durch die Wärmeinbringung verursachte Spannungsabfall berücksichtigt werden. Er ist je nach Höhe und Dauer der Wärmeeinwirkung verschieden und somit verfahrensabhängig (siehe Abb. 21). Auf Grund der hohen Wärmedehnung von un- und niedriglegierten Cu-Werkstoffen sollten beim manuellen Gas-, Lichtbogenhand- und Schutzgasschweißen der Schweißspalt durch gekeilte oder verschraubte Laschenverbindungen, die im Zuge des Schweißablaufs nacheinander entfernt werden, aufklaffend gehalten werden. Der Spalt sollte außerdem konisch verlaufen. [4], [6], [80]
Beim Gasschweißen ist eine hohe Vorwärmung notwendig, welche durch ein langsames Schweißen erreicht wird.

Prozess	Werkstückdicke t in [mm]	Ausführung	Art der Schweißnahtvorbereitung	Schnitt	Maße in [mm]			Bemerkung
					Winkel	Spalt ^a	Steghöhe	
Gas	≤ 2	einseitig	Bördelfuge		-	-	-	ohne Zusatzwerkstoff
	≤ 4	einseitig	I-Fuge		-	≤ 4	-	ohne Zusatzwerkstoff
	3 ≤ t ≤ 5	beidseitig	I-Fuge		-	3 ≤ b ≤ 5	-	gleichzeitig beidseitig Schweißen
	3 ≤ t ≤ 12	einseitig oder beidseitig	V-Fuge		≈ 60°	3 ≤ b ≤ 6	-	-
	> 6	einseitig	Y-Fuge		≈ 60°	3 ≤ b ≤ 6	≈ 3	-
	> 8	beidseitig	D-Y-Fuge		≈ 60°	4 ≤ b ≤ 8	≈ 4	gleichzeitig beidseitig Schweißen h1 ≠ h2 möglich

a: Maße für gehefteten Zustand, abhängig von Schweißprozess und -position
Tabelle 14 a: Fugenformen für Kupfer und Kupferlegierungen

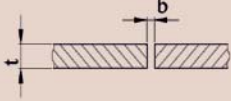
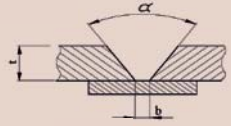
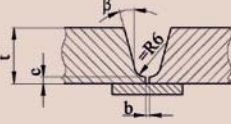
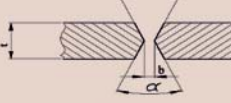

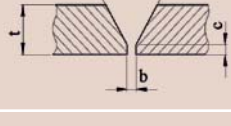

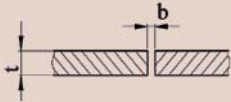
Prozess	Werkstück- dicke	Ausführung	Art der Schweißnaht- vorbereitung	Schnitt	Maße in [mm]			Bemerkung
	t in [mm]				Winkel	Spalt ^a	Steghöhe	
WIG	≤ 2	einseitig	Bördelfuge		-	-	-	ohne Zusatzwerkstoff
	≤ 4	einseitig	I-Fuge		-	≤ 3	-	-
	3 ≤ t ≤ 5	beidseitig	I-Fuge		-	≤ 4	-	gleichzeitig beidseitig Schweißen
	5 ≤ t ≤ 12	einseitig	V-Fuge		≈ 60°	≤ 6	-	mit Beilage (siehe DIN EN ISO 17659)
	≤ 12	einseitig oder beidseitig	V-Fuge		≈ 70°	≤ 6	-	-
	> 14	einseitig	U-Fuge		≈ 20°	≤ 3	≈ 3	auch ohne Beilage in Zwangslage
	6 ≤ t ≤ 18	beidseitig	D-V-Fuge (X-Fuge)		≈ 60°	≤ 6	-	-

a: Maße für gehefteten Zustand, abhängig von Schweißprozess und -position
Tabelle 14 b: Fugenformen für Kupfer und Kupferlegierungen

Bei einer Blechstärke von 3 mm beträgt die notwendige Vorwärmtemperatur etwa 300 °C, bei mehr als 10 mm bis zu 600 °C. Das Schweißteil wird großflächig erwärmt, weshalb durch den geringen Temperaturgradienten und den geringen Elastizitätsmodul ein großer Bauteilverzug auftritt. Deshalb ist das Fixieren mit Heftstellen beim Gasschweißen wegen der Gefahr des Aufreißens nicht sinnvoll. Bereits bei der Konstruktion sollten Bauteile verfahrensgerecht gestaltet werden. Bei den Strahlschweißverfahren kann der Schweißprozess wegen

des geringen Verzugs am Ende der Fertigung und sogar nach thermischen Prozessen wie Härten durchgeführt werden. Die Fugenform ist in Tab. 14 zu finden. Es ist zu beachten, dass die Rauheit der Fügeflächen nicht zu gering sein darf, um die Ausgasung im Fügespalt bei Tiefschweißungen zu gewährleisten. Nahtformen werden eingeteilt in Längs- und Rundnähte. Rundnähte wiederum werden unterteilt in Axial- und Radialnähte, was sich auf die Stellung des Strahls zur Bauteildrehachse bezieht. Bei einer Axialnaht ver-

läuft der Strahl parallel und bei der Radialnaht senkrecht zur Drehachse. Radialnähte eignen sich gut für die Massenfertigung und für höchst belastete Bauteile. Sie liefern gute Eigenstressverhältnisse und erfordern keine komplizierte Vorbereitung der Teile. Bei Axialnähten muss die auftretende Querschrumpfung berücksichtigt werden, die zur Spaltbildung gegenüber dem Nahtanfang führt. Wird sie behindert, können Risse auftreten. Durch Wahl einer geeigneten Passung und möglichst schlanker Nähte kann

Prozess	Werkstück- dicke	Ausführung	Art der Schweißnaht- vorbereitung	Schnitt	Maße in [mm]			Bemerkung
	t in [mm]				Winkel	Spalt ^a	Steghöhe	
	$4 \leq t \leq 6$	beidseitig	I-Fuge		-	≤ 3	-	-
	$5 \leq t \leq 20$	einseitig	V-Fuge		$\approx 60^\circ$	≤ 6	-	mit Beilage (siehe DIN EN ISO 17659)
	> 18	einseitig	U-Fuge		$\approx 20^\circ$	≤ 6	≈ 3	mit Beilage (siehe DIN EN ISO 17659)
	> 10	beidseitig	D-V-Fuge (X-Fuge)		$\approx 60^\circ$	≤ 3	-	Wurzel vorteilhaft WIG gleichzeitig- beidseitig
Plasma	≤ 5	einseitig	I-Fuge		-	-	-	einlagig, ohne Zusatzwerk- stoffe
	> 5	einseitig	Y-Fuge		-	-	-	mehrlagig, mit Zusatzwerk- stoffe
Elektro- nenstrahl	< 95 (un- leg. Cu) < 120 (Cu-Leg.)	einseitig	I-Fuge		-	-	$\leq 0,3$ (0,1 ... 0,2·t)	-
Laser	≤ 5	einseitig	I-Fuge		-	-	$\leq 0,3$	In Abhän- gigkeit des Lasersystems

a: Maße für gehefteten Zustand, abhängig von Schweißprozess und -position
Tabelle 14 c: Fugenformen für Kupfer und Kupferlegierungen

dies verhindert werden. Es sollten jedoch radiale Nähte wegen der besseren Eigenspannungsverhältnisse immer bevorzugt werden. Wenn nötig ist auch ein Schweißen mit Badsicherung möglich, die entweder konstruktiv am Bauteil vorgesehen wird oder die aus einem anderen Werkstoff besteht und durch Einlegieren die Eigenschaften des Schweißguts positiv beeinflusst. Häufig werden I-Nähte an T- oder Überlappstößen eingesetzt, die zwar nur geringe Festigkeitswerte aufweisen, aber gute Gestaltungsmöglichkeiten bieten. Bei der Gestaltung der Schweißvorrichtungen ist darauf zu achten, dass der austretende Strahl Platz braucht oder mit auswechselbaren Vorrichtungsteilen abgebremst wird. So kann auch eine unnötige Werkstückwärmerhöhung verhindert werden. Der Zuschnitt der Kupfer-Werkstücke wird meist mechanisch oder mit dem Wasserstrahlschneiden realisiert. Die Fugenvorbereitung beinhaltet die Herstellung der Fuge und die Reinigung, die entweder chemisch oder mechanisch erfolgen kann. Dann wird, wenn nötig, vorgewärmt.

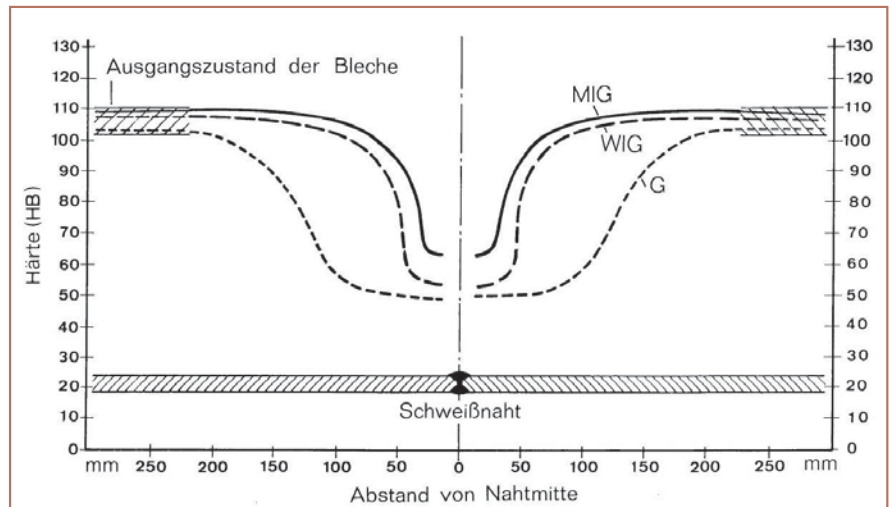


Abbildung 21: Härteverlauf bei verschiedenen Schmelzschweißverfahren (DKI 4669)

7.2 Schweißzusatzwerkstoffe

Die zum Schweißen einsetzbaren Zusatzwerkstoffe sind in DIN EN 14640 bzw. ISO 24373 aufgeführt. Zum Verschweißen von un- und niedriglegiertem Kupfer wird meist CuSn1 eingesetzt [42], da dieser Zusatz ein zähflüssiges Schmelzbad und ein porenfreies Schweißgut ermöglicht. CuAg1 wird nur

in Fällen eingesetzt, in denen die elektrische Leitfähigkeit der Schweißnaht wichtig ist, da das Schmelzbad leichtflüssig und die Naht porenanfälliger ist. Das Schweißgut ist weich und gut verformbar [48]. Beispiele für andere Zusatzwerkstoffe sind in Tab. 15 zu finden.

Zusatzwerkstoff	Wärmeleitfähigkeit	Schmelzbereich	Grundwerkstoffe	Verwendung für		
	W/(m·K)			°C	Knet- und Gusswerkstoffe	Gas
CuAg1*	220 ... 315	1070 ... 1080	unlegiertes Cu	sehr gut	sehr gut	gut
CuSn1	120 ... 145	1020 ... 1050	unlegiertes Cu	gut	sehr gut	sehr gut
CuSi3Mn1	35	910 ... 1025	unlegiertes Cu, CuSi-, CuZn-Legierungen, Auftragschweißen auf ferritisch-perlitische Stähle	schlecht	sehr gut	sehr gut***
CuSn6P	75	910 ... 1040	CuSn-Legierungen	gut	sehr gut	sehr gut
CuSn12P	55	825 ... 990	CuSn-Legierungen	gut	sehr gut	sehr gut
CuZn40SnSiMn	120	890 ... 910	CuZn-Legierungen	sehr gut	gut	schlecht***
CuAl8	65	1030 ... 1040	CuAl-Legierungen, Auftragschweißen auf ferritisch-perlitische Stähle	schlecht	sehr gut	sehr gut
CuAl10	57	–	CuAl-Legierungen, Auftragschweißen auf ferritisch-perlitische Stähle	–	–	–
CuAl8Ni2	50	1030 ... 1050	CuAlNi-Legierungen	schlecht	sehr gut	sehr gut
CuAl9Ni5	35	–	CuAlNi-Legierungen	–	–	–
CuMn13Al7	30	–	seewasserbeständige zinkfreie CuAl-Legierungen, Auftragschweißen auf ferritisch-perlitische Stähle	–	–	–
CuNi10	45	–	CuNi10Fe1Mn	–	–	–
CuNi30**	30	1180 ... 1240	CuNi10Fe1Mn, CuNi30Mn1Fe	schlecht	sehr gut	sehr gut

* für Gasschweißen mit P > 0,02 %, für Schutzgasschweißen mit P ≤ 0,02 % ** zum UP-Schweißen als UP-CuNi30Fe

*** Messing mit < 30 % Zn mit CuSi3Mn1 oder CuAl11Fe schweißbar, darüber nicht empfohlen

Table 15: Eigenschaften und Verwendung ausgewählte Schweißzusatzwerkstoffe

8. Qualitätssicherung

Im Gegensatz zu Stahl und Al gibt es nur wenige Normen für Kupferwerkstoffe. Deshalb gelten bei der schweißtechnischen Verarbeitung von Kupfer die entsprechenden allgemeinen Normen für das Fügen von Metallen.

Neben den Werkstoffnormen sind dies die jeweiligen Verfahrens- sowie Prüfnormen. Es sind zusätzlich zu den Normen auch Merkblätter des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS) erhältlich. Sie gelten oftmals für die schweißtechnische Verarbeitung von Metallen und Al und können allgemein auf das Schweißen von Kupferwerkstoffen angewendet werden.

Die wesentlichen Kupferwerkstoffe sind in der DIN CEN/TS 13388 aufgeführt. Dort sind die alten Werkstoffnormen sowie die darin aufgeführten Kupfersorten im Vergleich zu den neu genormten Werkstoffen zu finden. Die Tabellen mit der chemischen Zusammensetzung der Kupferwerkstoffe sind ebenfalls enthalten. Außerdem wurde eine Übersicht eingefügt, welche die

Kupfersorten den einzelnen Produktformen zuordnet.

Die Kupferwerkstoffe wurden nach der Produktform in verschiedene Normen aufgeteilt. Mögliche Formen sind z. B. Rohr, Stange, Profil und Draht.

In Abb. 22 sind die für die Schweißtechnik wichtigsten Normen aufgeführt. Das Qualitätsmanagementsystem DIN EN ISO 9001 und das Qualitätssicherungssystem DIN EN ISO 3834 sind allgemeine Normen bzw. Empfehlungen, DIN EN ISO 9606 oder die, und teilweise speziell für Kupferwerkstoffen. Dazu gehören u.a. die bereits beschriebene DIN CEN/TS 13388, die DIN EN 14640, in der die Schweißzusatzwerkstoffe für Kupfer und seine Legierungen aufgeführt sind und die DIN EN ISO 15614, die Schweißverfahrensprüfungen auch für Kupferwerkstoffe enthält.

Eine wichtige Norm in diesem Zusammenhang ist die DIN EN 1011, in der Empfehlungen zum Schweißen von Metallen mit dem Schutzgas-, Elektronen- und Laserstrahlschweißen zu finden sind. Eine Liste aller wichtigen

Normen ist im Anhang zu finden.

In der DIN EN ISO 15614-6, der Norm für die Anforderungen und Qualifizierung von Schweißverfahren, sind die empfohlenen Schweißnahtprüfverfahren für das Lichtbogen- und Gasschweißen mit den entsprechenden Normen aufgeführt. Es wird in dieser Norm empfohlen, Nahtunregelmäßigkeiten bei lichtbogengeschweißten Kupferwerkstoffen nach der DIN EN ISO 10042

(Lichtbogenschweißen von Al) zu bewerten. In Abhängigkeit der Anforderungen an das Bauteil und des eingesetzten Bereichs (geregelt, ungeregelt) wird eine Bewertungsgruppe der DIN EN ISO 10042 gewählt, der die Schweißnaht genügen muss. Dafür werden alle Nahtunregelmäßigkeiten einbezogen und gewichtet.

Für die Strahlschweißverfahren gibt es noch keine Norm. Da es jedoch große Unterschiede z. B. bei der Bewertung von Poren in einer Kupfer- und einer Al- oder Stahlschweißnaht gibt, wird ein DVS-Merkblatt angestrebt.

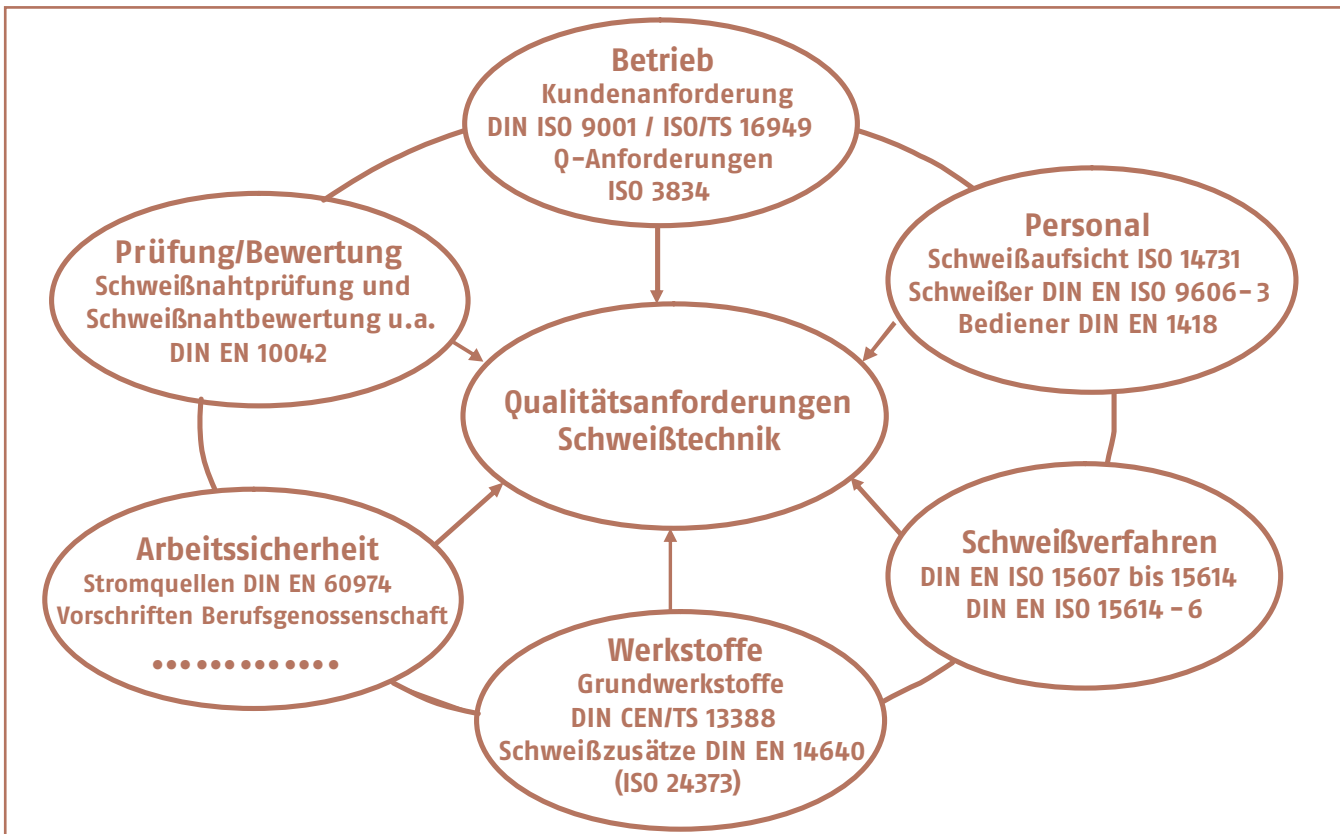


Abbildung 22: Sicherstellung der Produktqualität durch Erfüllung normativer Bedingungen

9. Anhang

9.1 Liste der Schweißverfahren nach DIN EN ISO 4063

Schweißverfahren	
Bezeichnung	Nummer
Lichtbogenhandschweißen	111
Metall-Schutzgasschweißen	13
Metall-Inertgasschweißen mit Massivdrahtelektrode	131
Wolfram-Inertgasschweißen mit Massivdraht- oder Massivstabzusatz; WIG-Schweißen	141
Plasmaschweißen	15
Gasschweißen mit Sauerstoff-Acetylen-Flamme	311
Widerstandsschweißen	2
Widerstandspunktschweißen	21
Rollennahtschweißen	22
Buckelschweißen	23
Abbrennstumpfschweißen	24
Pressstumpfschweißen	25
Widerstandspressschweißen mit Hochfrequenz	291
Ultraschallschweißen	41
Reibschweißen	42
Rührreibschweißen	43
Sprengschweißen	441
Diffusionsschweißen	45
Kaltpressschweißen	48
Strahlschweißen	5
Elektronenstrahlschweißen	51
Laserstrahlschweißen	52
Hubzündungs-Bolzenschweißen mit Keramikring oder Schutzgas	783
Kurzzeit-Bolzenschweißen mit Hubzündung	784
Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Hubzündung	785
Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung	786

9.2 Quellen

- [1] WITTKER, Klaus; FÜSSEL, Uwe: Kombinierte Fügeverbindungen. Berlin: Springer-Verlag, 1996
- [2] RUGE, Jürgen: Handbuch der Schweißtechnik Band 1: Werkstoffe. 3. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1991
- [3] SCHULZE, Günter: Die Metallurgie des Schweißens. 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2004
- [4] Fügetechnik – Schweißtechnik. 7. Auflage. Düsseldorf: DVS-Verlag, 2007
- [5] N. N.: Praxis schlägt Lehrbuch. WIG schweißt Kupfer ohne Vorwärmung. Weld + Vision – Magazin für Schweißtechnik Nr. 17 (2007)
- [6] Fügetechnik – Schweißtechnik. 5. Auflage, Düsseldorf: DVS-Verlag, 1995
- [7] DILTHEY, Ulrich: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1. Schweiß- und Schneidtechnologien. 3. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2006
- [8] AICHELE, G.: Schutzgasschweißen – Verfahren, Anwendung, Wirtschaftlichkeit, Messer-Griesheim GmbH, Broschüre Nr. 30.007, Frankfurt/Main, 1981
- [9] BEYER, W.: Kaltpressschweißen – Verfahrensvarianten und ihre praktische Anwendung, Der Elektro-Praktiker Nr. 29 (1975)
- [10] STEFANESCU, A.: Einige praktische Erfahrungen mit dem Kaltpressschweißen von Kupfer- und Aluminium-Kupfer-Verbindungen. Schweißen und Schneiden Jg. 25 (1973)
- [11] KREYE, H.; HAMMERSCHMIDT, M.: Metallkundliche Aspekte des Reibschweißens. Vortrag vor der Hauptversammlung der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde. Berlin, 1980
- [12] KLOCKE, Fritz; KÖNIG, Wilfried: Fertigungsverfahren 3 – Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung. 4. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2007
- [13] EICHLER, J.; EICHLER, H. J.: Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen. 4. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2002
- [14] MÜLLER, M.; Dobeneck, D. von: Vergleich zwischen Laser- und Elektronenstrahlschweißen. Jahrbuch Schweißtechnik 1990. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1989
- [15] HELTEN, S.: Laser-Hybrid-Schweißen. Laser – Entwicklung und industrielle Anwendung Nr. 1, Jg. 21 (2007)
- [16] KÖCHER, R.: Schweißen von Kupferwerkstoffen und Verbundwerkstoffen mit Plattierungsauflagen aus Kupferwerkstoffen. Jahrbuch Schweißtechnik 1990. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1989
- [17] STEFFENS, H. D.; SIEVERS, E. R.: Sauerstofffreies Kupfer und seine Eignung zum Elektronenstrahlschweißen. Schweißen und Schneiden Nr. 10, Jg. 42 (1990)
- [18] GRAVEMANN, H.: Diskussionsbeitrag: 5. Internationales Kolloquium „Schweißen in der Kerntechnik“, Nürnberg, 26. – 28.11.1986
- [19] GRAVEMANN, H.: Strukturbedingte Eigenschaften von Elektronenstrahlschweißnähten an Kupfer. Poster-Schau. Hauptversammlung Deutsche Gesellschaft für Metallkunde e.V., 9.-12.06, Saarbrücken
- [20] GRAVEMANN, H.: Verhalten elektronenstrahlgeschweißter Kupferwerkstoffe bei erhöhten Temperaturen. Metall Nr. 11, Jg. 43 (1989)
- [21] STEFFENS, H. D.; SIEVERS, E. R.: Festigkeitseigenschaften von elektronenstrahlgeschweißtem Kupfer bei erhöhten Temperaturen. Makroskopisches Verhalten, Analytische Untersuchungen. Persönliche Mitteilungen vom Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der Universität Dortmund. Dezember 1990
- [22] Deutsches Kupferinstitut: Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen. 1978
- [23] MURAIL, E.: Schweißen von Kupfer-Beryllium. ATB Metallurgie Jg. 17 (1977)
- [24] HASCHKE, H.; KÖCHER, R.: CuMn₂ – Herstellung, Eigenschaften, schweißtechnische Verarbeitung und Anwendung. Metall Jg. 26 (1972)
- [25] SIXT, B.: Reparaturschweißen von Schwermetall-Gussstücken. Gießerei-Praxis Jg. (1970)
- [26] HILBRANDS, H.; HOFFMANN, Th.: Neue Technologien beim Verbinden und Auftragen von Kupfer-Nickel-Legierungen im Rohrleitungs- und Apparatebau. Vortrag während der „Großen Schweißtechnischen Tagung Berlin 1972“
- [27] N. N.: Guide to the welding of copper nickel alloys. INCO Europe Ltd. 1979
- [28] RICHTER, F.; LÜDORFF, H.: Heißrisanfälligkeit und magnetische Permeabilität beim Werkstoff CuNi10Fe. Schweißen und Schneiden Nr. 2, Jg. 38 (1986)
- [29] WEILL-COULY, P.; RABANUS, K.: Kupfer-Aluminium-Legierungen – ihre Eigenschaften und Anwendungen in der Technik. Konstruktion Nr. 4, Jg. (1968)
- [30] KÜBER, B.: Schutzgasschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen. Metall Jg. 28 (1974)
- [31] WEILL-COULY, P.: Les cupro-aluminiums. Leur soudage, les applications. Communication présentée à la Société des Ingénieurs Soudeurs, 27.6.1963
- [32] WEILL-COULY, P.: Schweißen von Gussstücken aus Aluminiumbronze. Fonderie Jg. 27 (1978)
- [33] BELYAEV, V. N.: Some Features of Brazing and Welding Copper to Steel. Automatic Welding Nr. 7, Jg. 37 (1984)
- [34] HERRMANN, E.: Metallographische Untersuchung von Schweißverbindungen plattierter Werkstoffe für Apparate der chemischen Industrie. Praktische Metallographie Nr. 3, Jg. 11 (1974)

- [35] WEHNER, H.; WITTMANN, H.-P.; ZÜRN, H.: Schwarz-Rot-Verbindungen – Auftrag- und Verbindungsschweißen von Stahl- und Kupferwerkstoffen. DVS-Berichte 74. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1982
- [36] WEHNER, H.; WITTMANN, H.-P.; ZÜRN, H.: Schwarz-Rot-Verbindungen. Trennen und Fügen (Messer Griesheim GmbH) Nr. 10, Jg. (1983)
- [37] ZÜRN, H.: Mechanisiertes Auftragschweißen verschleißfester Werkstoffe. Chem. Ind. XXXII, 1980
- [38] Development of pulsed GMAW for all position peripheral welding of Copper-Nickel to steel ship hulls. L. W. Sandor, Manager, Materials Technology. Franklin Research Center, Philad. INCRA Project No. 352 (A), Final Report, 13th January 1984, Intern. Copper Research Assoc., New York, 1984
- [39] ROCKEL, M. B.; RUDOLPH, G.: Korrosionsverhalten von Schweißverbindungen des Verbundwerkstoffs CuNiFe/Stahl. Teil 1: Kurzzeit- und Meerwasserloop-Versuche. Werkstoffe und Korrosion Jg. 36 (1985)
- [40] ROCKEL, M. B.; RUDOLPH, G.: Korrosionsverhalten von Schweißverbindungen des Verbundwerkstoffs CuNiFe/Stahl. Teil 2: Korrosionsverhalten im Meerwasserprüfstand auf Helgoland. Werkstoffe und Korrosion Jg. 36 (1985)
- [41] IMHOFF, Ralf: Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen. In: 3. Internationaler Faserlaser-Workshop. Dresden, 2007
- [42] LAHNSTEINER, Robert: MIG-Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen. In: Deutsches Kupferinstitut: Fügen von Kupferwerkstoffen. Anwendung und Optimierung. Duisburg, 2008
- [43] Goecke, S.-F.: Energiereduziertes Lichtbogen-Fügeverfahren für wärmeempfindliche Werkstoffe. In: Große schweißtechnische Tagung, Essen, 2005
- [44] KOSCHLIG, Manfred: Fügen von Kupferwerkstoffen. Plattierungsverfahren. In: Deutsches Kupferinstitut: Fügen von Kupferwerkstoffen. Anwendung und Optimierung. Duisburg, 2008
- [45] DOBENECK, Dietrich von: Elektronenstrahlschweißen. Eine Schlüsseltechnologie im Fahrzeugbau für Straße, Schiene, Wasser, Luft und Weltraum. Deutschland: Eigendruck im Selbstverlag pro-beam AG & Co. KGaA, 2007
- [46] KÖCHER, R.: Sprengplattierte Stahlbleche mit Auflegewerkstoffen aus NE-Metallen und hochkorrosionsbeständigen Werkstoffen für Apparate und Anlagen der chemischen Industrie. Werkstoffe und Korrosion Jg. 28 (1977)
- [47] The Submerged Arc, Strip Cladding of Mild Steel with Copper and Copper Alloys. The University of Aston in Birmingham, England. Final Report INCRA Project No. 183, INCRA New York/London, 1975
- [48] GILDE, Werner: Das Schweißen der Nichteisenmetalle. Das Schweißen der Nichteisenmetalle unter Argon 1. Berlin: VEB Verlag Technik, 1961
- [49] FAHRENWALDT, Hans J.; SCHULER, Volkmar: Praxiswissen Schweißtechnik. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 2006
- [50] WELDON, B.; WEISNER, E.: Eigenschaften und Anwendungen von Kupfer-Nickel-Gußlegierungen. Schiff und Hafen Jg. 25 (1973)
- [51] Pro-beam: http://www.pro-beam.de/tic2/Vergleich-von-Elektronenstrahl-und-Laser_144_0.html – Aktualisierungsdatum: 20.07.2008
- [52] Interner Bericht von pro-beam
- [53] SCHULTZ, Helmut: Elektronenstrahlschweißen. 2. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Fachbuchreihe Schweißtechnik 93. Düsseldorf: DVS-Verlag, 2000
- [54] DOBENECK, Dietrich von: Elektronenstrahlschweißen. Das Verfahren und seine industrielle Anwendung. Die Bibliothek der Technik Band 22. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie, 2001
- [55] DOBENECK, Dietrich von: Elektronenstrahlschweißen. Anwendungsbeispiele aus 30 Jahren Lohnschweißpraxis. 2. Auflage. Deutschland: Eigendruck im Selbstverlag pro-beam AG & Co. KGaA, 2007
- [56] SEILKOPF, Jürgen: Elektronenstrahlschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen. In: Deutsches Kupferinstitut: Fügen von Kupferwerkstoffen. Anwendung und Optimierung. Duisburg, 2008
- [57] VOLLRATH, K.: Kupfer, Lehm und Granit: Das „Siegel der Ewigkeit“ für Kernbrennstäbe. Metall Nr. 4, Jg. 61 (2007)
- [58] ADAM, T.; GRECUK, V.; MARTINEK, I.: Ultraschallschweißen lackisolierter Kupferdrähte. DVS-Berichte 204. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1999
- [59] DANCE, B. G.: An introduction to electron beam welding metallurgy. Welding and Metal Fabrication Nr. 5, Jg. 62 (1994)
- [60] GREITMANN, Martin: Untersuchungen zum Nachsetzverhalten von Elektronenkraftsystemen beim Widerstandsbuckelschweißen. Schweißen und Schneiden Nr. 8, Jg. 47 (1995)
- [61] Trillmich, R.; Welz, W.: Bolzenschweißen. Grundlagen und Anwendung. Fachbuchreihe Schweißtechnik 133. Düsseldorf: DVS-Verlag GmbH, 1997
- [62] DILTHEY, U.; BEHR, W.: Elektronenstrahlschweißen an Atmosphärendruck. Der Praktiker Nr. 2, Jg. 52 (2000)
- [63] R. Hojda, Nachhaltigkeit bei der Werkstoffentwicklung und Werkstoffherstellung, Metall, 10/2008
- [64] Zambelli Fertigungs GmbH & Co. KG

- [65] DOBENECK, Dietrich von: Elektrostrahlschweißen. Eine Schlüsseltechnologie im Fahrzeugbau für Straße, Schiene, Wasser, Luft und Weltraum. Deutschland: Eigendruck im Selbstverlag pro-beam AG & Co. KGaA, 2007
- [66] DÜRR, U.: Reproduzierbares Laserschweißen. In: Deutsches Kupferinstitut: Fügen von Kupferwerkstoffen. Anwendung und Optimierung. Duisburg, 2008
- [67] CEDERQVIST, Lars: A Weld that Lasts for 100,000 Years – Friction Stir Welding of Copper Canisters for Spent Nuclear Fuel. DVS-Berichte 237, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2005
- [68] KAHRAMAN, Nizamettin; GÜLENC, Behçet: Microstructural and mechanical properties of Cu-Ti plates bonded through explosive welding process. Journal of Materials Processing Technology Nr. 1, Jg. 169 (2005)
- [69] MÜLLER, Christina; ELAGUINE, Mistislav; BELLON, Carsten; ZSCHERPEL, Uwe; SCHARMACH, Martin; REDMER, Bernhard; RYDEN, H.; RONNETEG, Ulf: Reliability evaluation of NDT techniques for Cu-welds for risk assessment of nuclear waste encapsulation. Materialprüfung Nr. 3, Jg. 48 (2006)
- [70] IMAI, Hisashi; MATSUOKA, Sin-ichi: Direct Welding of Metals and Ceramics by Ultrasonic Vibration. JSME International Journal Series A Nr. 3, Jg. 49 (2006)
- [71] WODARA, Johannes: Ultraschallfügen und -trennen. Fachbuchreihe Schweißtechnik 151. Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH, 2004
- [72] ADAM, Tino; GOUREEV, Vladimir; MARTINEK, Irmhild: Ultraschallschweißen von metallisch beschichteten Bauteilen in der Elektronik und Elektrotechnik. Schweißen und Schneiden Nr. 3, Jg. 55 (2003)
- [73] MATTHES, K.-J.; SCHÖNIG, S.; DRAUGELATES, U.; REITER, R.: Plasma-Pulverauftragschweißen von Kupfer auf Stahl. Schweißen und Schneiden Nr. 5, Jg. 49 (1997)
- [74] DRAUGELATES, Ulrich; SCHRAM, Antonia; DÜWEL, Volker: Diffusions-schweißverbindungen zwischen Metall und Keramik mit veränderter Makrogeometrie der keramischen Fügefläche. Schweißen und Schneiden Nr. 4, Jg. 51 (1999)
- [75] ZUCKSCHWERDT, Klaus; GREITMANN, Martin; ROOS, Eberhard; KUßMAUL, Karl: Ultraschallschweißen von unterschiedlich beschichteten Oxidkeramiken mit Anschlussteilen aus Kupfer. Schweißen und Schneiden Nr. 10, Jg. 51 (1999)
- [76] DZELNITZKI, D.; KILLING, R.: WIG-Impulsschweißen in verschiedenen Frequenzbereichen. Der Praktiker Nr. 3, Jg. 51 (1999)
- [77] GEBERT, Andreas; DUITSCH, Uta; SEMMLER, Ulrich; BOUAIFI, Belkacem; AIT-MEKIDECHE, Azedine: Erhöhung der Verschleißfestigkeit von Kupfer durch Legieren und Dispergieren mittels Plasma- und Wolfram-Inertgasschweißen. Schweißen und Schneiden Nr. 10, Jg. 51 (1999)
- [78] DORN, L.; STÖBER, E.: Mikro-Widerstandsschweißen von Metallkombinationen mit metallischen Überzügen. Metall Nr. 3, Jg. 39 (1985)
- [79] ANIK, Salâhaddin; DORN, Lutz: Metallphysikalische Vorgänge beim Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen – Werkstoffliche Grundlagen. Schweißen und Schneiden Nr. 12, Jg. 39 (1987)
- [80] ANIK, Salâhaddin; DORN, Lutz: Metallphysikalische Vorgänge beim Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen – Schweißverfahren. Schweißen und Schneiden Nr. 9, Jg. 40 (1988)
- [81] Werkzeug- und Maschinenbau Peter Wennrich
- [82] VEM Sachsenwerk GmbH
- [83] Piel & Adey GmbH & Co. KG
- [84] KNIPSTRÖM, Karl-Erik; PEKKARI, Bertil: Friction Stir Welding Process Goes Commercial. Welding Journal Nr. 9, Jg. 76 (1997)
- [85] PATON, B. E.; DUDKO, D. A.; YUSHCHENKO, K. A.; LYCHKO, I. I.; SUSHCHUK-SLYUSARENKO, I. I.: Electroslag Welding: A Status Report. Welding Journal Nr. 12, Jg. 76 (1997)
- [86] GUTH, Wolfgang; HUND, Paul; SCHWAB, Rainer: Buckelschweißen der Werkstoffpaarung Bronze/ Messing mit Gleich- und Wechselstrom. Schweißen und Schneiden Nr. 1, Jg. 39 (1987)
- [87] MESHARAM, S. D.; MOHANDAS, T.; MADHUSUDHAN REDDY, G.: Friction welding of dissimilar pure metals. Journal of Materials Processing Technology Nr. 1 – 3, Jg. 184 (2007)
- [88] DOMBLESKY, Joseph; KRAFT, Frank; DRUECKE, Benjamin; SIMS, Bart: Welded preforms for forging. Journal of Materials Processing Technology Nr.1, Jg. 171 (2006)
- [89] OUYANG, Jiahu; YARRAPAREDDY, Eswar; KOVACEVIC, Radovan: Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper. Journal of Materials Processing Technology Nr. 1, Jg. 172 (2006)
- [90] WIESNER, Peter: Pressschweißverfahren. Kalt-, Reib-, Diffusionsschweißen. In: Deutsches Kupferinstitut: Fügen von Kupferwerkstoffen. Anwendung und Optimierung. Duisburg, 2008
- [91] KATO, Kazuyoshi; TOKISUE, Hiroshi: Friction Welding of Aluminum to Copper. Journal of the Light Metal Welding & Construction Nr. 8, Jg. 43 (2005)

9.3 Normen*

DIN CEN/TS 13388	Kupfer und Kupferlegierungen. Übersicht über Zusammensetzungen und Produkte; Deutsche Fassung CEN/TS 13388:2008
DIN 1910-11	Schweißen. Werkstoffbedingte Begriffe des Metallschweißens
DIN 1910-100	Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe – Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005
DIN EN 1982	Kupfer und Kupferlegierungen. Blockmetalle und Gußstücke
DIN 8514	Lötbarkeit
DIN 8552-3	Schweißnahtvorbereitung – Fugenformen an Kupfer und Kupferlegierungen – Teil 3: Gasschmelzschweißen und Schutzgasschweißen
DIN 8593-6	Fertigungsverfahren Fügen Teil 6: Fügen durch Schweißen Einordnung, Unterteilung, Begriffe
DIN 8593-7	Fertigungsverfahren Fügen Teil 7: Fügen durch Löten Einordnung, Unterteilung, Begriffe
DIN-Fachbericht CEN ISO/TR 3834-6	Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen – Teil 6: Richtlinie zur Einführung von ISO 3834 (ISO/TR 3834-6:2007)
DIN EN 1011-5	Schweißen Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe Teil 5: Schweißen von plattierten Stählen
DIN EN 1011-6	Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 6: Laserstrahlschweißen
DIN EN 1011-7	Schweißen. Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe. Teil 7: Elektronenstrahlschweißen
DIN EN 14610	Schweißen und verwandte Prozesse. Begriffe für Metallschweißprozesse; Dreisprachige Fassung
DIN EN 14640	Schweißzusätze. Massivdrähte und stäbe zum Schmelzschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen. Einteilung
DIN EN ISO 3834-1	Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen – Teil 1: Kriterien für die Auswahl der geeigneten Stufe der Qualitätsanforderungen (ISO 3834-1:2006)
DIN EN ISO 3834-2	Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen – Teil 2: Umfassende Qualitätsanforderungen (ISO 3834-2:2006)
DIN EN ISO 3834-3	Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen – Teil 3: Standard-Qualitätsanforderungen (ISO 3834-3:2006)
DIN EN ISO 3834-4	Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen – Teil 4: Elementare Qualitätsanforderungen (ISO 3834-4:2006)
DIN EN ISO 4063	Schweißen und verwandte Prozesse Liste der Prozesse und Ordnungsnummern (ISO 4063 : 2008)
DIN EN ISO 5817	Schweißen – Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO 5817:2006)
DIN EN ISO 9692-1	Schweißen und verwandte Prozesse. Empfehlungen zur Schweißnahtvorbereitung . Teil 1: Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen, Gasschweißen, WIGSchweißen und Strahlschweißen von Stählen (ISO 9692-1:2003)
DIN EN ISO 9692-3	Schweißen und verwandte Prozesse Empfehlungen für Fugenformen Teil 3: Metall-Inertgasschweißen und Wolfram-Inertgasschweißen von Aluminium und Aluminium-Legierungen
DIN EN ISO 9692-4	Schweißen und verwandte Prozesse Empfehlungen zur Schweißnahtvorbereitung Teil 4: Plattierte Stähle
DIN EN ISO 13919-1	Schweißen Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten Teil 1: Stahl
DIN EN ISO 13919-2	Schweißen Elektronenstrahl- und Laserstrahl-Schweißverbindungen Richtlinie für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten Teil 2: Aluminium und seine schweißgeeigneten Legierungen
DIN EN ISO 14172	Schweißzusätze. Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von Nickel und Nickellegierungen. Einteilung (ISO 14172:2009)
DIN EN ISO 14175	Schweißzusätze – Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse (ISO 14175:2008)
DIN ISO 857-1	Schweißen und verwandte Prozesse Begriffe Teil 1: Metallschweißprozesse (ISO 857-1:1998)
DIN-Fachbericht CEN ISO/TR 15608	Schweißen – Richtlinien für eine Gruppeneinteilung von metallischen Werkstoffen
E DIN EN ISO 4063	Schweißen und verwandte Prozesse – Liste der Prozesse und Ordnungsnummern (ISO/DIS 4063:2008)
DIN EN ISO 9606-3	Prüfung von Schweißern Schmelzschweißen Teil 3: Kupfer und Kupferlegierungen
DIN EN ISO 15609-1	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung. Teil 1: Lichtbogenschweißen (ISO 15609-1:2005)
DIN EN ISO 15609-2	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung. Teil 2: Gasschweißen (ISO 15609-2:2001)
DIN EN ISO 15609-3	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung. Teil 3: Elektronenstrahlschweißen (ISO 15609-3:2004)

E DIN EN ISO 15609-4	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung. Teil 4: Laserstrahlschweißen und -plattieren (ISO/DIS 15609-4:2007)
DIN EN ISO 15609-5	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung. Teil 5: Widerstandsschweißen (ISO 15609-5:2004)
DIN EN ISO 15614-6	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung. Teil 6: Lichtbogen- und Gasschweißen von Kupfer und seinen Legierungen (ISO 15614-6:2006)
DIN EN ISO 15614-7	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung. Teil 7: Auftragschweißen (ISO 15614-7:2007)
DIN EN ISO 15614-11	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung. Teil 11: Elektronen- und Laserstrahlschweißen (ISO 15614-11:2002)
DIN EN ISO 15614-12	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung. Teil 12: Widerstandspunkt, Rollennaht und Buckelschweißen (ISO 15614-12:2004)
DIN EN ISO 15614-13	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißverfahrensprüfung. Teil 13: Pressstumpf und Abbrennstumpfschweißen (ISO 15614-13:2005)
DVS-Merkblatt 0901	Bolzenschweißprozesse für Metalle

*** Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Gültig sind jeweils die neuesten Ausgaben der Normen.**

9.4 Verlagsprogramm

Dach und Wand

Verhalten von Kupferoberflächen an der Atmosphäre;
Bestell-Nr. s. 131

.....

Dachdeckung und Außenwandbekleidung mit Kupfer;
Bestell-Nr. i. 30

.....

Ausschreibungsunterlagen für Klempnerarbeiten an Dach und Fassade
.....
Blau-Lila-Färbungen an Kupferbauteilen

Sanitärinstallation

Kupfer in Regenwassernutzungsanlagen;
Bestell-Nr. s. 174

.....

Metallene Werkstoffe in der Trinkwasser-Installation; Bestell-Nr. i. 156

.....

Die fachgerechte Kupferrohrinstallation;
Bestell-Nr. i. 158

.....

Kupferwerkstoffe in der Trinkwasseranwendung – den Anforderungen an die Zukunft angepasst;
Bestell-Nr. s. 196

Werkstoffe

Schwermetall-Schleuder- und Strangguss – technische und wirtschaftliche Möglichkeiten;
Bestell-Nr. s. 165

.....

Zeitstandeigenschaften und Bemessungskennwerte von Kupfer und Kupferlegierungen für den Apparatebau;
Bestell-Nr. s. 178

.....

Ergänzende Zeitstandversuche an den beiden Apparatewerkstoffen SF-Cu und CuZn20Al2;
Bestell-Nr. s. 191

.....

Einsatz CuNi10Fe1Mn plattierter Bleche für Schiffs- und Bootskörper
Use of Copper-Nickel Cladding on Ship and Boat Hulls;
Bestell-Nr. s. 201

.....

Kupfer-Nickel-Bekleidung für Offshore-Plattformen
Copper-Nickel Cladding for Offshore Structures;
Bestell-Nr. s. 202

.....

Werkstoffe für Seewasser-Rohrleitungssysteme
Materials for Seawater Pipeline Systems;
Bestell-Nr. s. 203

.....

Kupfer-Zink-Legierungen (Messing und Sondermessing)
Bestell-Nr. i. 5

.....

Kupfer-Zinn-Knetlegierungen (Zinnbronzen)
Bestell-Nr. i. 15

.....

Kupfer-Zinn- und Kupfer-Zinn-Zink-Gusslegierungen (Zinnbronzen)
Bestell-Nr. i. 25

.....

Kupfer – Werkstoff der Menschheit

.....

Messing – Ein moderner Werkstoff mit langer Tradition

.....

Von Messing profitieren – Drehteile im Kostenvergleich

.....

Messing ja – Entzinkung muss nicht sein!

.....

Bronze – unverzichtbarer Werkstoff der Moderne

Verarbeitung

Konstruktive Gestaltung von Formgussstücken aus Kupferwerkstoffen;
Bestell-Nr. s. 133

.....

Kupfer-Zink-Legierungen für die Herstellung von Gesenkschmiedestücken;
Bestell-Nr. s. 194

Richtwerte für die spanende Bearbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen;
Bestell-Nr. i. 18

Elektrotechnik

Optimale Auswahl und Betriebsweise von Vorschaltgeräten für Leuchtstofflampen;
Bestell-Nr. s. 180

.....

Brandsichere Kabel und Leitungen;
Bestell-Nr. s. 181

.....

Verteiltransformatoren
Bestell-Nr. s. 182

.....

Energiesparen mit Spartransformatoren;
Bestell-Nr. s. 183

.....

Wechselwirkungen von Blindstrom-Kompensationsanlagen mit Oberschwingungen;
Bestell-Nr. s. 185

.....

Messungen und Prüfungen an Erdungsanlagen;
Bestell-Nr. s. 190

.....

Sparen mit dem Sparmotor;
Bestell-Nr. s. 192

.....

Bedarfsgerechte Auswahl von Kleintransformatoren;
Bestell-Nr. s. 193

.....

Energiesparpotentiale bei Motoren und Transformatoren;
Bestell-Nr. i. 1

.....

Kupfer in der Elektrotechnik – Kabel und Leitungen

.....

Kupfer spart Energie

Umwelt/Gesundheit

Versickerung von Dachablaufwasser;
Bestell-Nr. s. 195

.....

Kupfer in kommunalen Abwässern und Klärschlämmen;
Bestell-Nr. s. 197

.....

Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und -verarbeitung;
Bestell-Nr. s. 198

.....

Sachbilanz zur Kupfererzeugung unter Berücksichtigung der Endenergien;
Bestell-Nr. s. 199

.....

Untersuchung zur Bleiabgabe der Messinglegierung CuZn39PB3 an Trinkwasser – Testverfahren nach British Standards BS 7766 and NSF Standard 61;
Bestell-Nr. s. 200

.....

Kupfer – Lebensmittel – Gesundheit;
Bestell-Nr. i. 19

.....

Recycling von Kupferwerkstoffen;
Bestell-Nr. i. 27

.....

Kupfer und Kupferwerkstoffe ein Beitrag zur öffentlichen Gesundheitsvorsorge;
Bestell-Nr. i. 28

.....

Kupfer – der Nachhaltigkeit verpflichtet

.....

Doorknobs: a source of nosocomial infection?

Spezielle Themen

Kupferwerkstoffe im Kraftfahrzeugbau;
Bestell-Nr. s. 160

.....

Die Korrosionsbeständigkeit metallischer Automobilbremsleitungen – Mängelhäufigkeit in Deutschland und Schweden;
Bestell-Nr. s. 161

.....

Kupfer – Naturwissenschaften im Unterricht Chemie;
Bestell-Nr. s. 166

Ammoniakanlagen und Kupfer-Werkstoffe?;
Bestell-Nr. s. 210

.....

Kupferwerkstoffe in Ammoniakkälteanlagen;
Bestell-Nr. s. 211

.....

Kupferrohre in der Kälte-Klimatechnik, für technische und medizinische Gase
Bestell-Nr. i. 164

DKI-Fachbücher*

Kupfer

.....

Chemische Färbungen von Kupfer und Kupferlegierungen

.....

Kupfer in der Landwirtschaft

.....

Kupfer im Hochbau
EUR 10,00***

.....

Planungsleitfaden Kupfer – Messing – Bronze
EUR 10,00***

.....

Architektur und Solarthermie
Dokumentation zum Architekturpreis
EUR 10,00

CD-ROM des Deutschen Kupferinstituts

Werkstoffdatenblätter
EUR 10,00

.....

Solares Heizen
EUR 10,00

.....

Neue Last in alte Netze?
EUR 10,00

.....

Faltmuster für Falzarbeiten mit Kupfer
Muster für Ausbildungsvorlagen in der Klempner-technik
EUR 10,00

.....

Werkstofftechnik – Herstellungsverfahren
EUR 10,00

Lernprogramm

Die fachgerechte Kupferrohr-Installation
EUR 10,00 **

Filmdienst des DKI

Das Deutsche Kupferinstitut verleiht kostenlos die nachstehend aufgeführten Filme und Videos:

„Kupfer in unserem Leben“
Videokassette oder DVD, 20 Min.
Schutzgebühr EUR 10,00
Verleih kostenlos

.....

„Fachgerechtes Verbinden von Kupferrohren“
Lehrfilm, DVD, 15 Min.
Schutzgebühr EUR 10,00
Verleih kostenlos

.....

„Kupfer in der Klempner-technik“
Lehrfilm, Videokassette, 15 Min.
Schutzgebühr EUR 10,00
Verleih kostenlos

* Fachbücher des DKI sind über den Fachbuchhandel zu beziehen oder ebenso wie Sonderdrucke, Informationsdrucke und Informationsbroschüren direkt vom Deutschen Kupferinstitut, Am Bonneshof 5, 40474 Düsseldorf.

** Sonderkonditionen für Berufsschulen

*** Sonderkonditionen für Dozenten und Studenten

**Auskunfts- und Beratungsstelle
für die Verwendung von
Kupfer und Kupferlegierungen**

Am Bonneshof 5
40474 Düsseldorf
Telefon: (0211) 4 79 63 00
Telefax: (0211) 4 79 63 10
info@kupferinstitut.de

www.kupferinstitut.de

┌

┐

└

┘